

ENGINYERIA D'EDIFICACIÓ PROJECTE FINAL DE GRAU

CARACTERITZACIÓ DE L'ENVOLVENT DE DOS CONJUNTS D'EDIFICIS MITJANÇANT TÈCNIQUES TERMOGRÀFIQUES

Projectista/es: Sánchez Manchón, Patricia
Director/s: Bosch González, Montserrat
Jordana i Riba, Francesc de Paula
Convocatòria: Gener 2013

RESUM

El present estudi tracta sobre l'ús de tècniques infraroges en el sector de l'Edificació, enfocant-se principalment a l'anàlisi termogràfic de l'envolvent de dos conjunts edificatoris de diferent ús i característiques, amb la finalitat d'obtenir dades que ens aportin informació rellevant, per avaluar les possibilitats d'estalvi energètic dels edificis.

L'objectiu d'aquest projecte és intensificar l'ús de la termografia dins del sector de l'Edificació, tècnica la qual es troba en els seus principis.

Per poder donar a conèixer aquesta tècnica dins del nostre ram, el projecte s'organitza en dues parts:

La primera part està centrada en una secció teòrica, enfocada a treballar tots els conceptes que fonamenten la tècnica de la Termografia, ja que es considera imprescindible que el lector entengui l'essència d'aquest art i pugui consultar aquest treball posteriorment en cas de dubte potencial, com a manual sobre Termografia.

I la segona part, es desenvolupa en un apartat pràctic relacionat amb l'anàlisi Termogràfic d'edificis Escolars i d'una mançana de l'Eixample, dels quals s'estan realitzant avaluacions energètiques i/o dels quals ja s'han finalitzat, per tal de complementar la informació obtinguda fins ara i introduir el tema de la Termografia a Projectes Finals de Grau d'estudis d'Enginyeria d'Edificació. Aquesta última part del projecte posarà en marxa tots els coneixements teòrics que s'hauran après durant la primera exposició del treball.

S'ha escollit treballar sobre dos conjunts edificatoris diferents per tal d'obtenir, analitzar, processar i comparar termogrames de distintes solucions constructives segons l'època de construcció i ús de l'edifici.

Amb aquesta nova tècnica es pretén aportar informació innovadora a Estudis energètics, de manera que s'obtinguin de forma ràpida (a temps real), bidimensional, multidisciplinar i no invasiva, dades per analitzar les pèrdues energètiques dels edificis. Cal destacar que poder controlar la variable de temperatura ens aportarà moltes avantatges, en temes de rehabilitacions energètiques i impactes ambientals dels edificis.

Donar continuïtat a aquests Projectes Finals de Grau, ens ajudarà a intercanviar informació entre estudiants, a introduir una part més innovadora dins d'aquesta temàtica de PFG, i a treballar directament i conjuntament amb els estudiants sobre els coneixements que engloben la tècnica de la Termografia.

ÍNDEX

PREFACI	4	2.5.4 PARTS I EINES D'UNA CÀMERA TERMOGRÀFICA (PRESENTACIÓ DE LA CÀMERA TH9100 MR/WR)	33
GLOSSARI	5	2.5.5 FUNCIONAMENT DE LA CÀMERA TH9100 MR/WR	35
1. INTRODUCCIÓ	6	2.5.6 SOTWARE DE TRACTAMENT D'IMATGES TÈRMiques	36
2. ESTUDI TEÒRIC	7	2.6 COMPARACIÓ ENTRE MÈTODES DE MESURA TRADICIONALS I TERMOGRÀFICS	38
2.1 CONCEPTES BÀSICS	7	3. ESTUDI PRÀCTIC	39
2.1.1 QUÈ ÉS LA TERMOGRAFIA?	7	3.1 COM REALITZAR UNA IMATGE TERMOGRÀFICA	39
2.1.2 FONAMENTS DE LA TERMOGRAFIA (ESTUDI CIENTÍFICO-TÈCNIC)	8	3.2 L'OBJECTE MESURAT I EL SEU ENTORN (MESURAMENT DE LA TEMPERATURA AMB LA CÀMERA TERMOGRÀFICA)	39
2.1.2.1 ASPECTES SOBRE LA TEMPERATURA I LA CALOR	8	3.3 DETERMINACIÓ PRÀCTICA DE LA EMISSIVITAT I LA TEMPERATURA DE LA RADIACIÓ REFLECTIDA	41
2.1.2.2 ASPECTES SOBRE L'AIRE HUMIT	10	3.4 ANÀLISI DE LES IMATGES TÈRMiques	42
2.1.2.3 TRANSMISSIÓ DE CALOR EN RÈGIM ESTACIONARI O TRANSITORI	12	3.5 ERRORS DURANT UNA INSPECCIÓ TERMOGRÀFICA	43
2.1.2.4 MECANISMES DE TRANSMISSIÓ DE CALOR	12	3.6 RESUM PART PRÀCTICA DEL PROJECTE: ANÀLISI TERMOGRÀFIC DELS DIFERENTS EDIFICIS	43
2.2 HISTORIA DE LA TERMOGRAFIA	19	4. CONCLUSIONS / RECOMANANCIONS	44
2.2.1 EVOLUCIÓ DE LA TERMOGRAFIA	19	5. BIBLIOGRAFIA	45
2.3 APLICACIONS DE LA TERMOGRAFIA	21	6. ÍNDIX DE FIGURES I TAULES	47
2.4 MARC NORMATIU	29	7. AGRAÏMENTS	48
2.4.1 ISO EN 13187:1999 (1999)	29	ANNEXES:	
2.4.2 UNE EN 13829:2002 (2002)	30	1. ANÀLISI TERMOGRÀFIC EDIFICIS (APLICACIÓ PRÀCTICA A CASOS REALS)	
2.4.3 ASTM C1153-97 (2003)	30	2. PLANTILLA INFORMES REALITZATS AMB EL SOFTWARE	
2.4.4 ASTM C1060-90 (2003)	30	3. FOTOGRAFIES DELS DIFERENTS EDIFICIS ANALITZATS	
2.4.5 ASTM C1046-95 (2007)	30	4. TAULES D'EMISSIVITAT I CONDUCTIVITAT TÈRMICA DELS MATERIALS	
2.5 LA CÀMERA TERMOGRÀFICA	31	5. ARTICLES ELISABETTA ROSINA (TEXTOS ORIGINALS)	
2.5.1 COM FUNCIONA LA CÀMERA TERMOGRÀFICA?		6. RESUM I TRADUCCIÓ CONTINGUT ARTICLES ELISABETTA ROSINA	
2.5.2 CALIBRATGE DE LA CÀMERA TERMOGRÀFICA	31	7. TÍTOL D'ASSISTÈNICA I INFORMACIÓ PONÈNCIA TESTO	
2.5.3 SENSIBILITAT D'UNA CÀMERA TERMOGRÀFICA (RESOLUCIÓ)	31	8. TAULA COMPARATIVA DE CÀMERES TERMOGRÀFIQUES I ENQUESTA A TERMOGRAFICS	

PREFACI

En els últims mesos, el consum energètic dels edificis està ocupant un lloc important en l'actualitat. Recentment s'ha aprovat una nova Directiva d'Eficiència Energètica que, entre altres àrees d'actuació, dóna importància a la necessitat de millorar l'eficiència en els edificis, àrea responsable del 40 % del consum energètic total.

A nivell nacional el projecte normatiu més significatiu és el Reial Decret de Certificació, el qual exposa que qualsevol habitatge que es compri, es vengui o es llogui compti amb un certificat que avaluï el seu consum i comportament energètic.

Sabem que la construcció és un dels sectors amb major potencial d'estalvi energètic, per aquest motiu, treballar en la línia de la rehabilitació energètica d'una vivenda millorarà l'estalvi i l'eficiència en l'ús domèstic de l'energia. Es dóna importància a treballar sobre edificacions existents, ja que les millores energètiques només en les noves construccions no són suficients per reduir el consum d'energia, degut a que s'han de tenir presents les emissions de les edificacions ja construïdes que consumeixen un 40 % d'energia i generen un 30 % d'emissions de CO₂.

La detecció i el control de les pèrdues energètiques ocasionades en la major part dels casos per les anomalies en la construcció, és una de les mesures més importants per aconseguir reduir el consum d'energia en edificació.

Aquesta situació conjuntament amb l'interès per poder deixar a les nostres generacions futures un planeta en condicions òptimes per viure, ha motivat a que la realització del projecte s'enfoqués a treballar en aquesta línia d'evolució i progrés, investigant sobre noves tècniques d'actuació.

GLOSSARI

- **Absorció:** Quantitat de radiació absorbida per un objecte respecte a la radiació rebuda. S'expressa mitjançant un número comprés entre 0 i 1.
- **Calibratge:** Procediment en el que es determinen i comparen les lectures d'un instrument (valors reals) i les de un instrument de referència (valors nominals). El resultat indica si les lectures reals d'un instrument es situen dins dels límits permissibles.
- **Calor Latent:** És l'energia requerida per una quantitat de substància per canviar de fase, de sòlid a líquid (calor de fusió) o de líquid a gasós (calor de vaporització). S'ha de tenir en compte que aquesta energia en forma de calor s'inverteix per al canvi de fase i no per a un augment de la temperatura; per tant en canviar de gasós a líquid i de líquid a sòlid s'allibera la mateixa quantitat d'energia.
- **Camp:** Interval de l'escala de temperatura expressat normalment com valor d'una senyal.
- **Càmera Termogràfica:** Càmera que mesura la radiació infraroja i converteix la senyal en una imatge tèrmica.
- **Capacitat tèrmica:** La capacitat tèrmica, també denominada capacitat calorífica, és el quocient entre la quantitat d'energia calorífica transferida a un cos o sistema en un procés qualsevol i el canvi de temperatura que experimenta.
- **Celsius:** Unitat de temperatura. A pressió normal, el punt zero de l'escala Celsius (0°C) és la temperatura de congelació de l'aigua.
- **Condensació:** Transició d'una substància de l'estat gasós al líquid.
- **Conducció:** Fenomen que fa que el calor es propagui per un material.
- **Conductivitat tèrmica:** És una propietat física dels materials que mesura la capacitat de conducció de calor.
- **Convecció:** Mètode de transferència de calor que consisteix en un fluid en moviment (a causa de la gravetat o una altre força), que transfereix el calor d'un lloc a un altre.
- **Cos negre:** Objecte que no reflexa cap radiació. Tota radiació que emet és deguda ala seva temperatura pròpia.
- **Detector:** El detector rep la radiació infraroja i la converteix en una senyal elèctrica.
- **Difusivitat:** Capacitat d'un material d'adaptar-se a la temperatura que l'envolta.
- **Emissivitat:** Quantitat de radiació procedent d'un objecte respecte a la d'un cos negre. S'expressa mitjançant un número comprés entre 0 i 1.
- **Emitància:** Quantitat emesa per un objecte per unitat de temps i àrea (W/m^2).
- **Energia radiada:** Quantitat d'energia emesa per un objecte per unitat de temps, àrea i angle ($W/m^2/sr$).
- **Entorn:** Objectes i gasos que emeten radiació cap a l'objecte que s'està mesurant.
- **Fahrenheit:** Unitat de temperatura utilitzada generalment en Nord-Amèrica.
- **Filtre:** Material transparent només en algunes longituds d'ones infraroges.
- **FOV:** De l'anglès Field of View (camp de visió). Angle horitzontal visible a través d'una lent d'infrarojos.
- **Humitat relativa:** Indicador en percentatge de la quantitat de saturació de vapor d'aigua en l'aire.
- **IFOV:** De l'anglès Instantaneous Field of View (camp de visió instantani). Mesura de la resolució geomètrica d'una càmera d'infrarojos.
- **Inèrcia tèrmica:** és la propietat que indica la quantitat de calor que pot conservar un cos i la velocitat amb que la cedeix o absorbeix de l'entorn. Depèn de la massa, de la calor específica dels seus materials i del coeficient de conductivitat tèrmica d'aquests.
- **Infraroig:** Radiació invisible amb una longitud d'ona entre 2 y 13 μm ..
- **IR:** Infraroig.
- **Imatge tèrmica:** Imatge que mostra la distribució de la temperatura en les superfícies dels objectes mitjançant diferents colors pels diferents valors de temperatura.
- **Kelvin:** Unitat de temperatura. 0 Kelvin correspon a = absolut.
- **Micròmetre:** Unitat de longitud equivalent a una milionèsima part d'un metre.
- **Objectiu:** La grandària de l'angle de visió i en conseqüència la mida de la marca de mesura varien segons l'objectiu utilitzat,
- **Paleta de colors:** Conjunt de colors utilitzats per mostrar una imatge d'infrarojos.
- **Punt de rosada:** És la temperatura de condensació de l'aigua.
- **Punter làser:** Font de llum amb alimentació elèctrica present en la càmera.
- **Radiació Infraroja:** Radiació electromagnètica de calor.
- **Radiador:** Equip de radiació infraroja.
- **Radiador de cos negre:** Equip de radiació d'infrarojos amb les propietats d'un cos negre, utilitzat per calibrar les càmeres d'infrarojos.
- **Rang de temperatures:** Límit de mesura de temperatura global d'una càmera d'infrarojos. Les càmeres poden tenir diferents rangs.
- **Termograma:** Imatge d'infrarojos.
- **Transmissió:** Els gasos i altres materials poden ser més o menys transparents, La transmissió és la quantitat de radiació infraroja que passa a través d'ells. S'expressa mitjançant un número comprés entre 0 i 1.
- **Transmitància tèrmica:** Flux de calor per grau de temperatura entre dos ambients isoterms i per unitat de superfície d'una de les cares isoterms d'un tancament, ja que separa dos ambients.

1. INTRODUCCIÓ

És un fet que els edificis han de deixar de ser un problema ambiental. Tal i com s'ha citat anteriorment, actualment l'edificació és responsable del 40 % de les emissions a l'atmosfera, i és important prendre consciència sobre els aspectes com l'estalvi d'aigua, l'eficiència energètica, l'ús d'energies renovables o la conservació de materials i recursos.

Degut a la crisi del petroli succeïda en la dècada de 1970, es va començar a tenir més coneixement de que les nostres reserves energètiques tenen valor i són limitades, i sabem que l'escalfament global produït per les emissions de CO₂ està causat pel consum d'energia tèrmica.

En el cas dels edificis, les majors pèrdues es produeixen a través de les façanes i les cobertes, ja que aquestes conformen l'envolvent exterior. Per aquest motiu els principals esforços enfocats a minimitzar aquestes dissipacions energètiques, estan dirigits a la detecció d'irregularitats en l'aïllament, a la presència de ponts tèrmics, a les deficiències de materials, etc.

Aquestes anomalies es reflecteixen en forma de variacions de temperatura sobre les superfícies de l'estructura, i poden ser detectades a partir de la Termografia, tècnica per infrarojos.

Aquest Projecte Final de Grau vol aportar l'alternativa de donar a conèixer un sistema únic per a l'estudi o l'avaluació de l'eficiència energètica dels edificis, la "Termografia".

Si cerquem el significat d'aquesta paraula en un diccionari, trobarem una definició general la qual ens diu, que es tracta d'una tècnica que permet mesurar temperatures exactes, a distància, sense la necessitat de contacte físic amb l'objecte a analitzar.

Aquesta definició és coneguda globalment dins del sector de la medicina, la geologia, l'aeronàutica, i el manteniment industrial, tecnologia la qual es troba molt desenvolupada, i la qual ha aportat resultats precisos i immediats.

En el camp de l'edificació, arquitectes i tècnics, actualment s'enfronten a nous materials i terminis d'execució cada vegada més curts. S'exigeix una planificació, revisió i documentació més eficient en referència a aïllaments tèrmics, condicions de salubritat, etc. La tècnica de la Termografia pot proporcionar la informació necessària per evitar reparacions costoses, i contribuir en un estalvi econòmic i un comportament eficient de l'edifici. Per aquest motiu aquest Projecte es centra en treballar amb aquesta tècnica, la qual es troba en els seus principis en el món de l'edificació, i on podem percebre que aquest concepte és encara desconegut majoritàriament per estudiants i tècnics d'aquest ram.

La primera línia del Projecte es centra en la recerca documental de la tècnica de la Termografia, ja que és imprescindible obtenir un nivell de coneixement bàsic per poder realitzar una correcta posada en pràctica.

En referència a la part pràctica, les dades de partida per a la realització de la mateixa, han estat alguns Projectes Finals de Grau, els quals s'estaven realitzant paral·lelament a aquest projecte, o els quals havien estat realitzats prèviament per estudiants de la nostra Escola. Em semblava interessant treballar sobre edificacions existents, de les quals s'estaven realitzant estudis energètics o els quals ja s'havien realitzat, i cercar maneres d'intervenció a partir de la Termografia amb l'objectiu de donar a conèixer aquesta tècnica entre els estudiants, i poder reduir els consums energètics cercant les diferents deficiències degudes a l'ús i als sistemes constructius dels edificis.

2. ESTUDI TEÒRIC

2.1 CONCEPTES BÀSICS

2.1.1 QUÈ ÉS LA TERMOGRAFIA?

Termografia Infraroja, etimològicament significa “escriptura amb calor d'allò que està per sota del vermell”.

La Termografia és la tècnica de la captació de la radiació infraroja. Consisteix en la visualització i/o mesura de la distribució tèrmica emesa per la superfície d'un objecte, en forma de radiació electromagnètica infraroja, a partir de càmeres termogràfiques que converteixen l'energia radiada, en informació sobre temperatura. El coneixement d'aquesta franja, de l'espectre electromagnètic i del comportament físic dels materials respecte a la radiació que emeten es deu als estudis de científics com Planck, Kirchhoff, Wien, Stefan i Boltzmann¹.

Una càmera termogràfica mesura l'ona llarga de la radiació infraroja rebuda en el camp de visió, a partir de la qual calcula la temperatura de l'objecte a mesurar. La càmera ens proporciona un termograma (imatge generada), que es tracta d'una representació en una paleta de colors de les diferències de radiació dels objectes. Com la radiació infraroja és una paràmetre directament relacionat amb la temperatura, una inspecció termogràfica permet observar les diferències de temperatura dels materials, fent ús d'un mètode de mesura passiu, sense contacte.

La informació tèrmica correspon a un patró, un estat puntual en quan a la seva temperatura, ja que l'objecte no es considera com a aïllat, sinó que es trobarà sota condicions canviants, envoltat d'altres objectes que l'influencien.

Tal i com he citat anteriorment, la imatge termogràfica mostra la distribució de temperatura en la superfície d'un objecte, per tant una càmera termogràfica no es pot utilitzar per mirar a l'interior o a través dels objectes. Aquesta característica permet diferents aplicacions en l'àmbit de l'edificació, ja que les pèrdues de calor i l'aïllament, són elements clau per a l'eficiència energètica dels edificis i el confort dels usuaris, i es visualitzen en forma de temperatura en les superfícies dels paraments dels edificis.

Les característiques que defineixen la tècnica de la Termografia són: és un mètode de mesura a temps real, no invasiva (és a dir, mesura sense contacte directe), bidimensional (es pot mesurar la temperatura en dos o més punts d'un mateix objecte en el mateix moment) i multidisciplinària (les

imatges no només ens donen informació sobre temperatura, sinó ens aporten valors de patrons tèrmics, comportaments, deficiències, etc.).

L'espectre electromagnètic

Després d'aquesta introducció, i avançant sobre el tema de la Termografia, es fa necessari parlar de l'espectre electromagnètic, concepte que no estem acostumats a referir, però que ens trobem sota la seva influència constantment.

L'espectre electromagnètic és el rang de tots els tipus de radiació electromagnètica, classificats per longitud d'ona.

Una ona és la propagació d'una pertorbació que transfereix energia progressivament d'un punt a un altre a través d'un medi, i que pot tenir la forma de deformació elàstica, una variació de pressió, una intensitat magnètica o elèctrica o de temperatura.

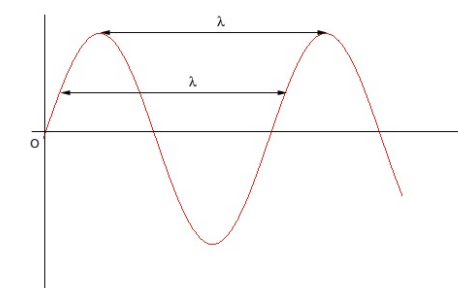


Figura 2.1: Imatge propagació ona electromagnètica (Font: Cientec)

Les ones es distribueixen en funció de la seva energia al llarg de l'espectre electromagnètic. Aquest, s'estén des de la radiació de menor longitud d'ona com els raigs gamma o raigs X, passant per la llum ultraviolada, la llum visible i els raigs infraroigs, fins a les ones de ràdio.

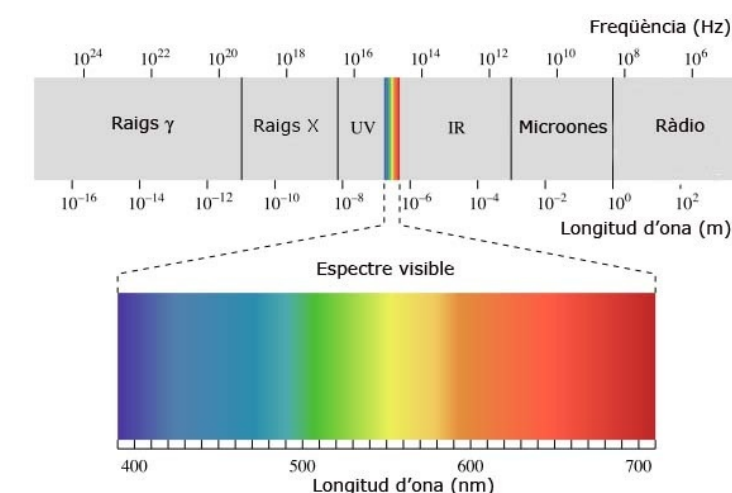


Figura 2.2: Espectre electromagnètic, regió visible per l'ull humà. (Font: Revista Catalana Geografia)

¹ Planck, Kirchhoff, Wien, Stefan i Boltzmann: Científics que van estudiar la radiació electromagnètica dels cossos. Llei de la radiació de Planck, Llei de la radiació de Kirchhoff, Llei distribució radiació de Wien, Llei radiació Stefan i Boltzmann.

La radiació infraroja és una part de l'espectre electromagnètic que no és visible per l'ull humà. L'ull humà té una zona molt petita de l'espectre, entre 0,4 i 0,70 micròmetres. Els raigs infrarojos tenen menys energia que els raigs visibles, per aquest motiu són inofensius. El camp d'ona amb el que es treballa amb la càmera és entre 0,7 i 100 micròmetres, el que s'anomena la part de banda llarga dels raigs infrarojos. A la figura 2.3, es mostren dues imatges diferents, una de llum visible, i una altre de llum infraroja, corresponents a diferents bandes de l'espectre electromagnètic.

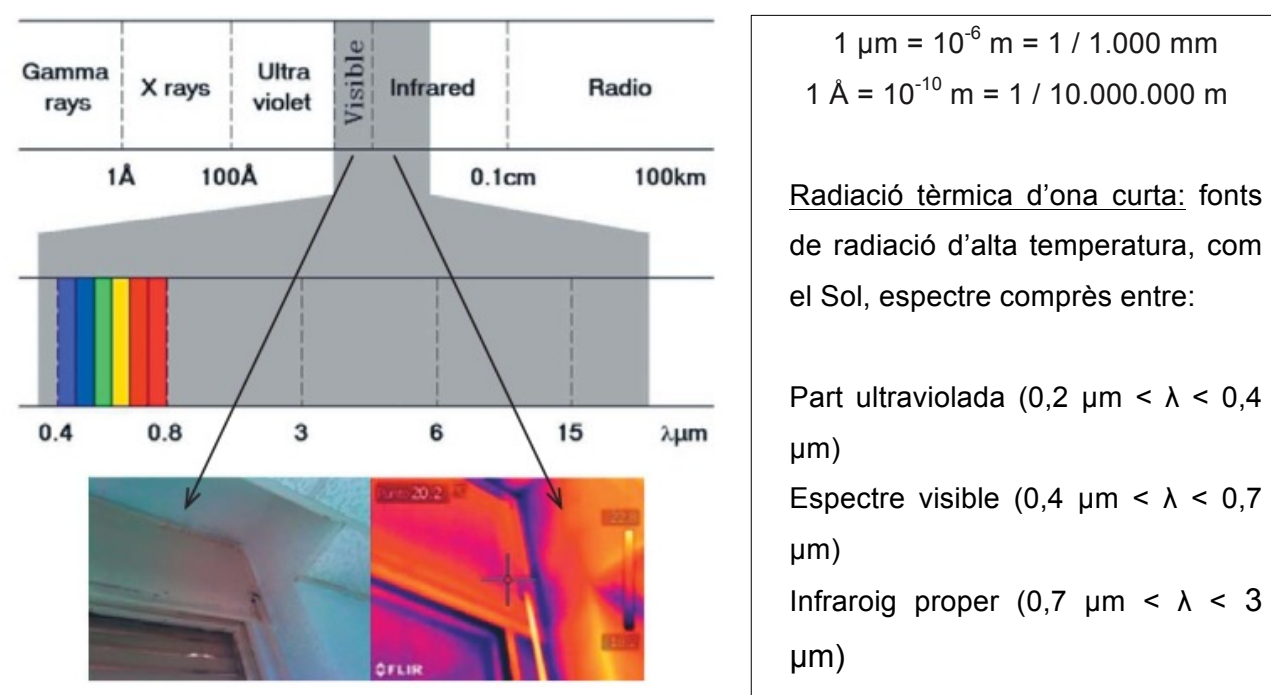


Figura. 2.3: Exemple diferents bandes de l'espectre electromagnètic (Font: Fenercom)

Qualsevol objecte que tingui una temperatura superior al zero absolut (o $0^\circ \text{ kelvin} = -273,15^\circ \text{C}$), emet radiació infraroja, invisible per l'ull humà.

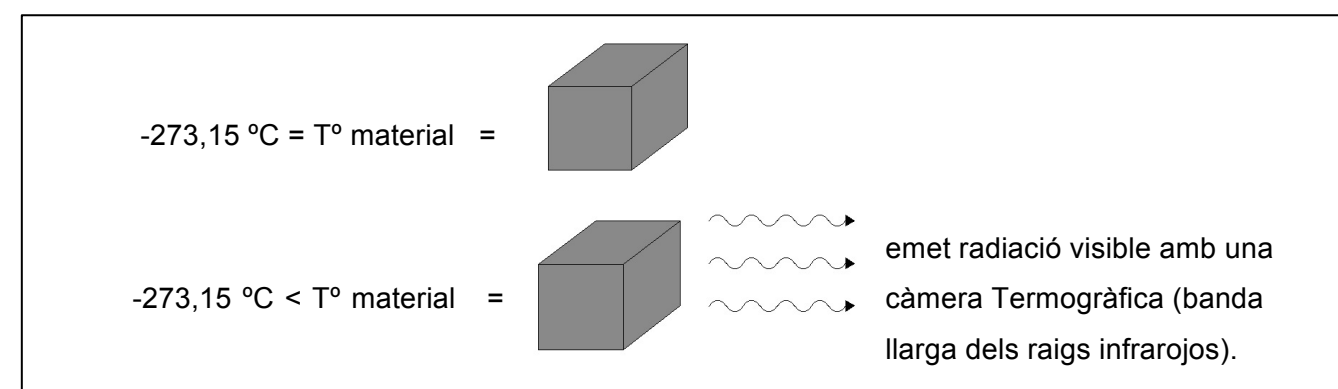


Figura. 2.4: Esquema emissió de radiació d'un objecte en funció de la seva temperatura (Font: Elaboració pròpia)

Aquesta radiació infraroja pot ser detectada ja que els sensors de raigs infrarojos (capacitats per visualitzar longituds d'ona), estan dissenyats d'una material cristal·lí, que genera un canvi en una superfície elèctrica quan està exposat a la calor en forma de raigs infrarojos. Quan la quantitat de radiació és considerable, el vidre i la càrrega en la superfície elèctrica canvien, i aquest canvi pot ser mesurat pel sensor, i d'acord amb l'equació de calibratge de l'aparell, generen un resultat final utilitzant una gamma de colors que l'ull humà si que pot visualitzar.

2.1.2 FONAMENTS DE LA TERMOGRAFIA (ESTUDI CIENTÍFICO-TÈCNIC)

Per poder entendre la tècnica de la Termografia és imprescindible treballar sobre els fonaments físics, que són necessaris per justificar com es genera aquesta art. Gràcies a la física, podem convertir les mesures de la radiació infraroja en mesures de temperatura. La temperatura és una variable fonamental en l'anàlisi de qualsevol procés físic. Tot i això, la mesura pràctica d'aquest paràmetre és difícil, ja que no és possible la seva mesura directa, sinó a través d'una altre variable relacionada amb ella. Per exemple, mesurar la temperatura amb un termòmetre convencional, es basa en la transmissió de calor per conducció (cossos en contacte).

La Termografia infraroja utilitza la transmissió de calor per radiació, com a variable relacionada amb la temperatura, permetent la realització de mesures de zones on no es podrien realitzar amb un termòmetre convencional, per la seva dificultat d'accés i d'una manera ràpida i precisa.

En aquest apartat ens centrem en treballar tots els conceptes físics que participen directa o indirectament en la mesura amb la Termografia.

2.1.2.1 ASPECTES SOBRE LA TEMPERATURA I LA CALOR

Les condicions tèrmiques d'un espai habitat són conseqüència de l'intercanvi de calor entre l'edifici i l'espai exterior. Aquest intercanvi es produeix per mecanismes de radiació, conducció, convecció, dissipació per renovació d'aire, etc. conceptes que es treballaran vers aquest projecte, i que ajudaran a entendre com és possible la visualització i mesura d'imatges Termogràfiques. Tot i això, per poder treballar sobre mecanismes de transmissió de calor, s'han d'entendre dos conceptes principals que són la Temperatura i la Calor, els quals es troben relacionats, però es tracten de dos termes diferents.

Temperatura:

La temperatura és la manifestació de l'energia interna d'un cos o una substància deguda al moviment de les seves partícules. Contra més moviment realitzin els àtoms, el grau de temperatura augmenta. Es mesura en Kelvin (K) o graus Celsius (°C).

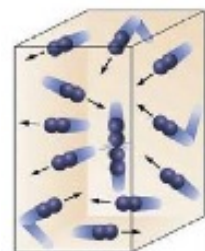


Figura. 2.5 Moviment de les molècules en l'interior d'un cos (Font: Fenercom)

$T (K) = T (°C) + 273,16 \rightarrow$ Tal i com he esmentat anteriorment, és interessant una elevada temperatura per poder visualitzar radiació infraroja.

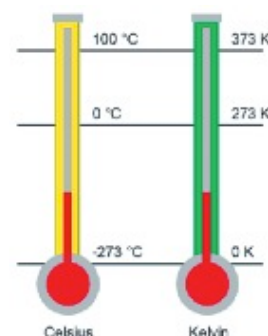


Figura. 2.6: Escales de Temperatura en °C (Celsius) i °K (Kelvin) (Font: Fenercom)

La Temperatura és una mesura relativa que ens ajuda a definir l'estat en el qual es troba un objecte. És a dir, ens diu com es troba un objecte en relació a un altre, i és la conseqüència de l'energia que posseeix el mateix. Aquest paràmetre, és una mesura que permet comparar uns cossos amb uns altres, a diferència de la calor, concepte que treballarem posteriorment, que es tracta d'una magnitud quantificable i mesurable.

A la vegada, els cossos tindran una **capacitat tèrmica** per absorbir o emmagatzemar calor. Aquesta propietat és molt útil, ja que per exemple, durant una inspecció termogràfica es podria localitzar el nivell d'un líquid contingut en un recipient opac, gràcies a les diferents capacitats tèrmiques del líquid i de l'aire.

Calor:

La calor és l'energia transmesa entre cossos, com a conseqüència d'una diferència de temperatura. Es mesura en Joule (J), caloria (cal) o Kilocaloria (kcal).

Quan un cos augmenta la seva temperatura acumula calor en la seva massa. Els tancaments dels edificis acumulen grans quantitats de calor degut a la seva gran massa, i a causa d'una elevada temperatura. Aquesta emissió de radiació infraroja pot ser visible amb una càmera termogràfica. En aquest apartat, s'ha de tenir present la "Llei de transferència de calor", la qual ens diu que la calor es transfereix des de les zones més calentes a les zones més fredes (veure fig.2.6).

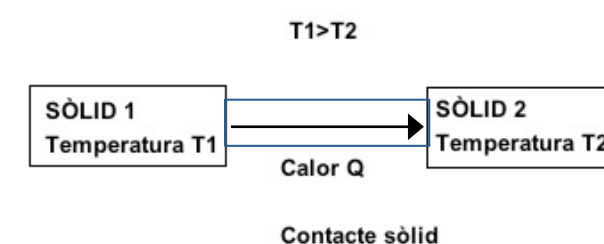


Figura. 2.7: Esquema Llei de Transferència de calor (Font: Elaboració pròpia)

Tipus de Calor:

- Calor específic (C_p): Calor necessari per elevar en 1 °C 1 kg de material (es mesura en J/kg·K, kcal/kg°C).

Quan hi ha transferència de calor entre dos cossos, es pot obtenir la quantitat de calor transferida mitjançant la següent fórmula:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T$$

C: Capacitat calorífica del sistema

ΔT : Increment de Temperatura (T.final – T.inicial)

$$\Delta Q = C_p \cdot m \cdot \Delta T$$

m: massa

C_p : Calor específic (depèn de la capacitat calorífica del sistema)

- Calor per canvi de fase:

Cal remarcar que en els edificis, també es poden produir fenòmens de canvi de fase de l'aigua, generalment per processos d'evaporació d'aigua líquida i condensació del vapor d'aigua ambient. Tanmateix poden produir-se processos de congelació i fusió.

L'estat de l'aigua depèn de la relació entre les forces moleculars, i l'energia interna (Temperatura). Aquests canvis d'estats porten associats intercanvis de calor, que es tindran en compte durant una inspecció termogràfica.

- Calor absorbit o cedit en un canvi de fase:

El canvi de líquid a vapor pot aparèixer en tota la massa del líquid i a temperatura constant (ebullició) o en la superfície del líquid i a qualsevol temperatura (evaporació). L'evaporació depèn de: la Temperatura, la superfície específica, la humitat ambiental i la velocitat de l'aire (vent).

El calor absorbit o cedit es pot calcular amb la següent fórmula:

$$Q = m \cdot L \quad L: \text{calor latent de canvi d'estat}$$

- Si el canvi d'aigua és de líquid a vapor: $L = 540 \text{ kcal/kg} = 2260 \text{ kJ/kg}$
- Si el canvi d'aigua és de sòlid a líquid: $L = 80 \text{ kcal/kg} = 334 \text{ kJ/kg}$

2.1.2.2 ASPECTES SOBRE L'AIRE HUMIT

Ens referim a aire humit, aquell que té una humitat relativa superior al 80 %, i el qual hem de tenir present en el moment d'una inspecció Termogràfica d'un edifici.

Tipologies d'humitat:

- Humitat absoluta: quocient entre la massa de vapor d'aigua (en grams) i la massa d'aire (en kg).

$$W = \frac{Mv}{Maire} \text{ (g/kg)}$$

- Humitat relativa: quocient entre la pressió de vapor de l'ambient i la corresponent pressió de valor saturant.

$$Hr = \frac{Pv}{Ps} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

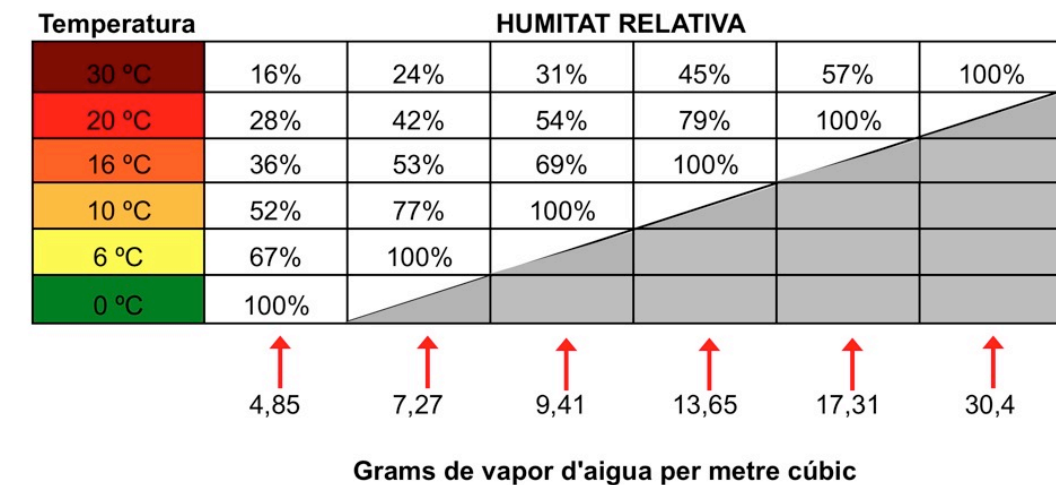


Figura. 2.8: Diagrama de variació de la humitat relativa en funció de la Temperatura °C. (Font: UPC)

En l'aire que ens envolta existeix vapor d'aigua en quantitats variables. L'aire humit està format per: aire sec (78% de Nitrogen, 21% d'Oxigen, 0,96% d'Argó i 0,04% de Diòxid de Carboni) + vapor d'aigua².

La capacitat per contenir vapor és limitada i depèn de la temperatura. Per cada temperatura ambient existeix una capacitat màxima de contingut de vapor. I en el moment que l'aire no admet més vapor parlem d'aire saturat.

La humitat relativa està relacionada amb el llunyà o proper que s'estigui de la situació de saturació. Es defineix en termes de pressions:

- Pressió de saturació: Pressió que exerceix el vapor en equilibri amb l'aigua líquida, a una determinada temperatura. El seu valor és independent de les quantitats de líquid i vapor presents mentre existeixin ambdues. En la situació d'equilibri, les fases reben la denominació de líquid saturat i vapor saturat.

² El vapor d'aigua a pressions molt baixes (<0,1 bar) es comporta pràcticament com un gas ideal. Aquestes condicions es corresponen amb les pressions parcials a les quals es troba del vapor d'aigua en l'aire humit, per la qual cosa assumirem el seu comportament com a gas ideal, amb un pes molecular de 18,015 kg/kmol.

La pressió de saturació augmenta considerablement amb la temperatura:

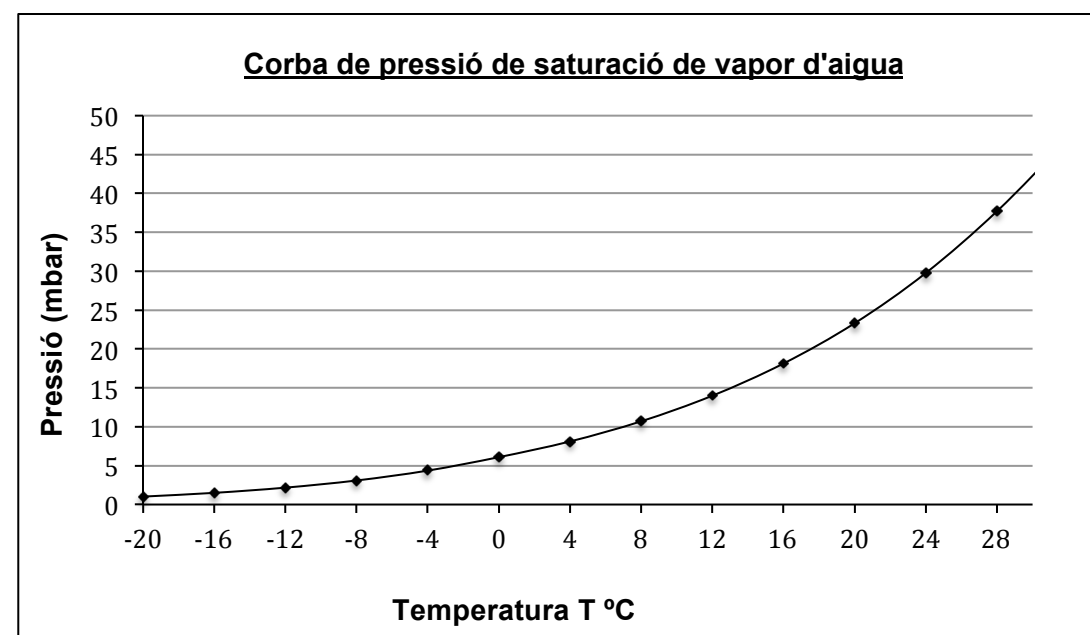


Figura. 2.9: Gràfic de la variació de Pressió en funció de la Temperatura. (Font: Elaboració pròpia)

- Pressió parcial de vapor: Pressió que exerceix el vapor contingut en l'aire humit.

Evaporació i Condensacions en tancaments

Un cop explicats els conceptes més rellevants sobre física de l'aire humit, és important parlar de com es comporta aquest, en algunes circumstàncies, provocant evaporacions o condensacions en els tancaments. Aquests processos, s'han de tenir presents durant una inspecció Termogràfica, ja que segons el procediment (evaporació o condensació) la imatge final quedarà alterada.

L'evaporació es caracteritza pel refredament de la superfície, degut a que l'aigua absorbeix tota la calor de la superfície. En canvi, si el vapor d'aigua es condensa en aigua líquida, l'aigua cedeix calor a l'ambient.

Com ja sabem, el vapor d'aigua que conté l'aire sempre passa de l'ambient on hi ha major pressió de vapor a l'ambient on hi ha menys pressió de vapor, aquest procés s'anomena difusió.

Les humitats de condensació es produeixen quan un flux de difusió d'aire humit que travessa el tancament, aconsegueix el punt de rosada, és a dir, es troba amb una capa on l'aire no admet tota la quantitat de vapor d'aigua de la difusió i condensa.

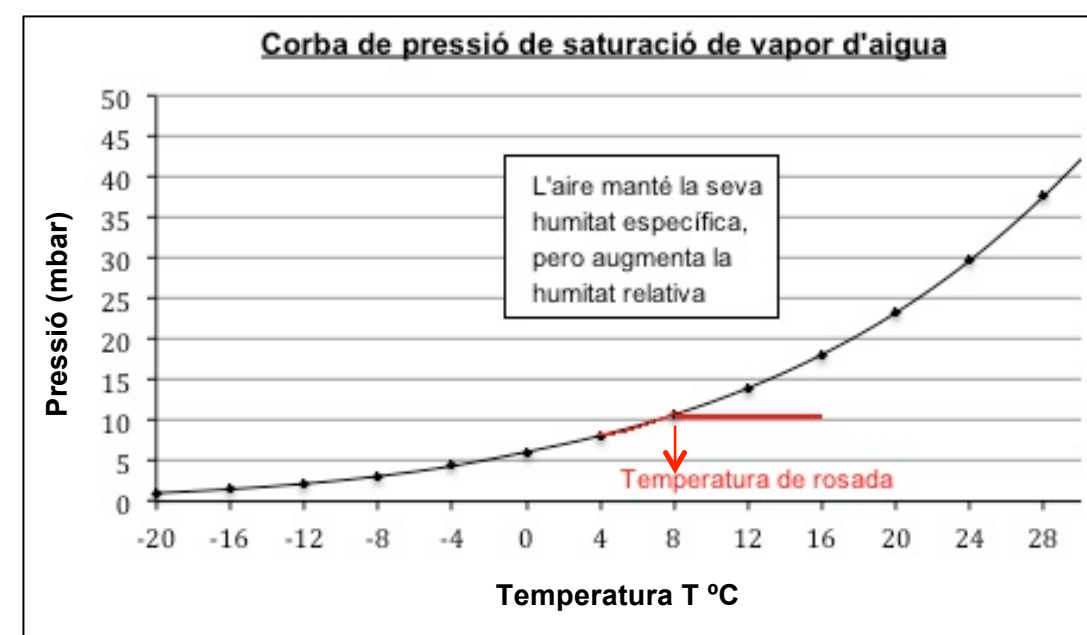


Figura. 2.10: Gràfic on s'observa el punt de rosada, i l'estat de l'aire. (Font: Elaboració pròpia)

El punt de rosada és la temperatura a la que s'ha d'escalfar l'aire, mantenint constant la seva pressió i contingut de vapor, per aconseguir la saturació.

Les condensacions es poden produir tant en la superfície del tancament, com en alguna de les seves capes interior i depèn del comportament higròtermic dels materials que componen la façana i de les característiques ambientals de la zona en la que es troba ubicat l'edifici.



Figura. 2.11: Imatge condensacions en terra i paret (Font: Fenercom)

2.1.2.3 TRANSMISSIÓ DE CALOR EN RÈGIM ESTACIONARI O TRANSITORI

La transmissió de calor dependrà d'aquestes dues situacions típiques. Les condicions estacionaries succeeixen quan hi ha condicions estables, sense canvi de temperatura i amb un flux de calor constant, és a dir quan les potències de calor i l'escalfament són iguals (allò que entra és igual a allò que surt).

En canvi, un procés transitori és aquell en el que existeixen canvis de temperatura i de flux de calor, fet que és més habitual en els nostres objectes d'estudi, els edificis.

Transmissió de calor en règim estacionari

En una paret en règim estacionari (aire-tancament-aire), si es considera els tres mecanismes de transmissió tèrmica, els valors de la resistència superficial (convecció + radiació), s'incorporen a la resistència del tancament com una resistència en sèrie més:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{se}$$

Transmitància tèrmica: $U = 1/R_T$

Transmissió de calor en règim transitori

Al llarg del dia es donen variacions en la temperatura exterior. Per exemple pot ocórrer que durant el dia augmenti la temperatura exterior per sobre de l'interior, penetrant calor, mentre que per la nit passi al contrari.

Els tancaments van acumulant i dissipant calor. La difusivitat tèrmica α , indica la facilitat amb que els canvis de temperatura es propaguen dins d'un cos. Es pot calcular mitjançant la següent expressió:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (\text{m}^2/\text{s}, \text{m}^2/\text{h})$$

En un edifici, el retràs en la modificació de la seva temperatura quan varia la temperatura exterior s'anomena **Inèrcia Tèrmica**.

Menor λ
Major ρ
Major c } = menor difusivitat α = evolució més lenta = major inèrcia tèrmica.

2.1.2.4 MECANISMES DE TRANSMISSIÓ DE CALOR:

Sempre que es tenen dos cossos a diferent temperatura, l'energia calorífica es transmet de la regió més calenta a la més freda (Llei de transferència de la calor, esmentada anteriorment). Existeixen tres mecanismes bàsics de transmissió de calor:

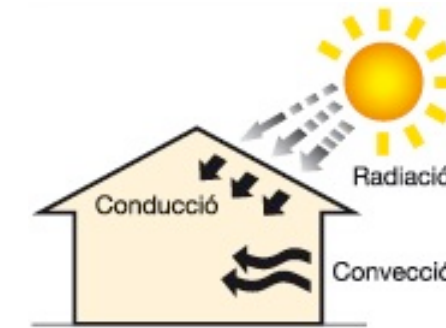


Figura. 2.12: Mecanismes de transmissió de calor (Font: Fenercom)

Cadascun d'aquests tres mètodes pot descriure's com a estable o inestable. Durant una transferència en estat estable, la velocitat de la transferència de calor serà constant, i no canviarà de sentit. Amb això es vol dir que no existeix un flux de calor estable ideal, a la pràctica els fluxos són inestables i presenten certes fluctuacions.

Les fluctuacions de la temperatura exterior d'un edifici tenen una forma sinusoidal amb un període de 24 hores.

CONDUCCIÓ:

És la transferència d'energia tèrmica entre partícules confrontants. A diferència de la convecció (que s'explicarà posteriorment), en la conducció no existeix transport de partícules.

Característiques:

- Es transmet la calor sense transport de matèria.
 - Es realitza per interacció entre àtoms o molècules.
 - En gasos és el menys important mecanisme de transmissió, i en sòlids més important que en líquids.
- En Sòlids: Es produeix una aturada d'energia dels àtoms de la xarxa cristal·lina que vibren amb major energia (major temperatura), als àtoms que vibren amb menys energia (menor temperatura).

- En Líquids i gasos: La calor es condueix com a conseqüència directa dels xocs entre molècules. Quan les molècules d'energia més elevada col·lisionen amb les molècules de menor energia, part de l'energia de les primeres es transfereix a les segones.

Per determinar el flux de calor transmès per conducció en règim estacionari per unitat de superfície H, s'han de conèixer els factors que intervenen:

$$H = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{e}$$

λ = Coeficient de conductivitat tèrmica del material (W/m·K), (que indica la facilitat d'un material per conduir energia tèrmica).

$T_1 - T_2$ = Diferència de temperatura (K)

e = espessor del material

La pèrdua de calor és proporcional a la conductivitat tèrmica (λ), per aquest motiu, els materials aïllants han de tenir aquest coeficient tan petit com sigui possible.

***Nota:** A l'annex 4, s'exposa una taula amb les propietats tèrmiques de materials de construcció i aïllants, on es pot observar els diferents valors de conductivitat tèrmica, entre altres.

Exemple conductivitat de dos materials en un edifici:

A continuació s'exposa un cas real de transmissió de calor per conducció. Es tracta d'un local de fàbrica de maó i ciment, calefactat a 21 °C.



Figura 2.13: Imatge infraroja d'un local interior. (Font: Fenercom)

El termograma de la figura 2.13, està pres des de l'interior d'un local calefactat a 21 °C. Es pot observar els maons (amb una conductivitat tèrmica $\lambda = 0,8$ W/mK), i el ciment ($\lambda = 1.047$ W/mK) de les juntes. La temperatura exterior és d'uns 6 °C.

El gruix de la paret és constant, per tant l'únic factor que altera la calor transmesa, és la conductivitat tèrmica dels materials. Com la conductivitat del ciment és més gran, es visualitza amb els colors més freds de la paleta de colors, en canvi es pot visualitzar que el maó en tota la seva superfície incloent els buits d'aire interiors, aïlla més el local de la temperatura exterior.

CONVECCIÓ:

És el transport de calor en qualsevol supòsit en el que l'energia tèrmica passa d'un sòlid a un líquid o gas, a conseqüència del transport de partícules.

Es pot classificar en:

- Convecció Natural: El moviment és degut a la variació de densitat amb la temperatura. La força de la gravetat és la que provoca el moviment. Depèn de: la Temperatura, l'Orientació de la superfície i de la Direcció del flux de calor.
- Convecció Forçada: El moviment es produeix externament, amb l'actuació per exemple d'un ventilador. Depèn entre altres coses, de la velocitat de l'aire.

L'estudi de les corrents de convecció és molt complex, considerant:

$$H = hc (T - T_a) \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$$

hc : Coeficient de convecció

T : Temperatura superfície

T_a : Temperatura fluid

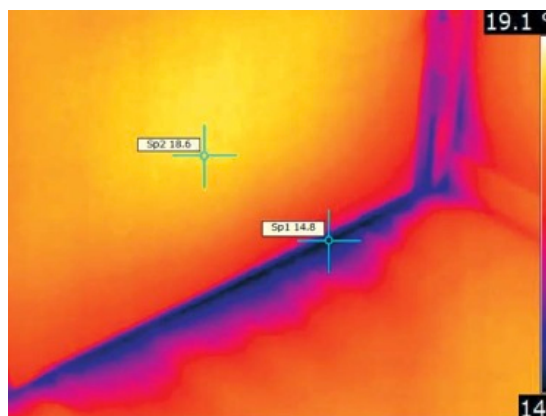
Exemple de flux de calor per convecció invisible en un edifici:

Figura. 2.14: Imatge habitació calefactada amb infiltracions d'aire de l'exterior. (Font: Fenercom)

A la imatge de la figura 2.14, es pot observar una habitació calefactada amb infiltracions d'aire fred de l'exterior. Aquest fet es pot visualitzar amb la càmera termogràfica, gràcies a l'efecte d'escalfament que es produeix en la superfície del terra. L'aire entra degut a les diferències de pressió entre l'exterior i l'interior de l'edifici.

RADIACIÓ:

S'anomena transmissió de calor per radiació quan la superfície del tancament intercanvia calor amb l'entorn, mitjançant l'absorció i emissió d'energia per ones electromagnètiques.

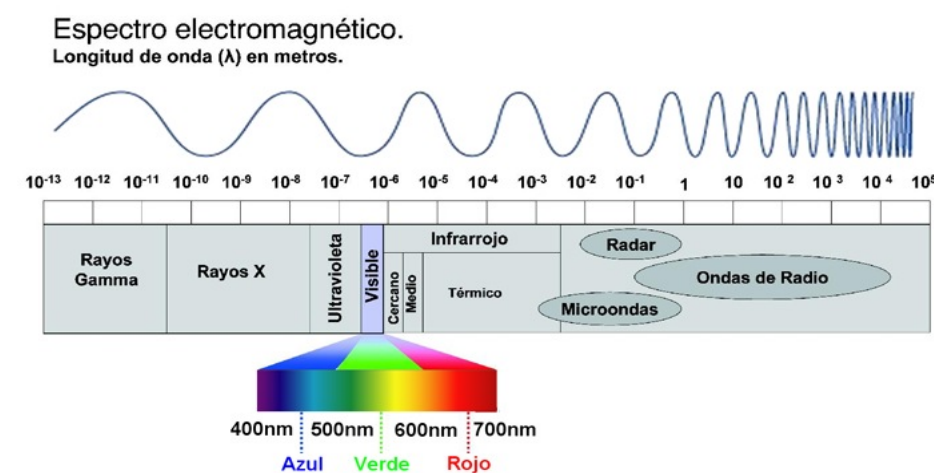
Mentre que en la conducció i la convecció és necessari l'existència d'un medi material per transportar l'energia, en la radiació el calor es transmet a través del buit, o travessant un medi transparent com l'aire.

La radiació tèrmica és una forma de radiació electromagnètica. Tots els cossos, emeten aquest tipus de radiació com a conseqüència de la seva temperatura. Segons el material que el compona, el cos serà major o menor emissor de radiació tèrmica.

Les superfícies emeten energia en forma de radiació:

- De magnitud proporcional a la quarta potència la seva temperatura absoluta.
- En un rang de longitud d'ona inversament proporcional a la seva temperatura absoluta.
T. major \rightarrow longitud d'ona menor \rightarrow freqüència major

Cal destacar que les fonts d'elevada temperatura, com el Sol o l'enllumenat artificial, emeten "radiacions d'ona curta" corresponents a l'espectre de radiació de l'infraroig proper, visible i part de la ultraviolada. Les superfícies a temperatures típiques de l'ambient, emeten "radiacions d'ona llarga" corresponents a l'espectre infraroig llunyà.

Figura. 2.15: Diagrama Espectre electromagnètic, mostrant la longitud d'ona (λ), en metres.(Font: cs-fs-primer)**INTERCANVI D'ENERGIA PER RADIACIÓ:**

Els processos d'intercanvi d'energia per radiació són molt importants per un termògraf que realitzi inspeccions d'edificis, ja que per exemple en una façana d'un edifici que es vol analitzar, aquesta rebrà una radiació específica, absorbirà part d'aquesta radiació, reflectirà una altra part i la resta la transmetrà a l'interior.

Per entendre aquest mecanisme de transmissió de calor és necessari inicialment treballar sobre fonaments físics:

Radiació incident:

La radiació incident es tota aquella radiació que arriba a un objecte des de qualsevol font del seu entorn.

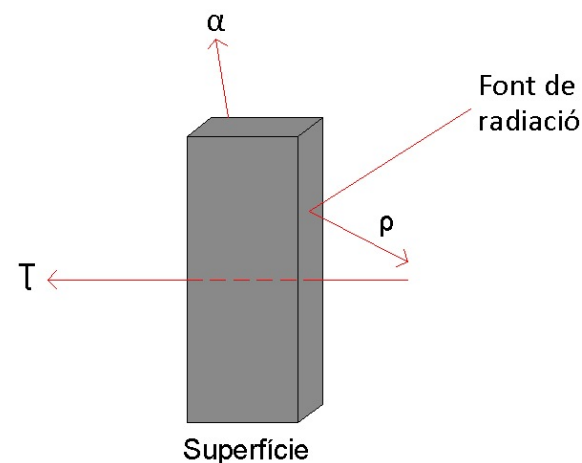


Figura 2.16: Esquema radiació incident (Font: Elaboració pròpia)

Com es pot observar en aquest esquema, d'una font o diferents fonts surt una determinada radiació, la qual arriba a la superfície d'un objecte, i una part d'aquesta energia l'absorbeix el cos (α), l'altre part és reflectida (ρ) per l'objecte i l'altre part és transmesa (τ).

Radiació incident $\rightarrow \boxed{\alpha + \rho + \tau = 1}$

Radiació sortint:

La radiació sortint és aquella que surt de la superfície d'un objecte. Aquesta radiació és la que el termògraf determina amb la càmera.

Llei de Planck³:

Tal i com va demostrar el físic Max Planck, a l'any 1900, existeix una correlació entre la temperatura d'un cos i la intensitat de la radiació infraroja que emet. Aquest físic, es va encarregar d'estudiar com convertir la radiació que mesura la càmera en temperatura.

La radiació registrada per la càmera termogràfica consisteix en la radiació d'ona llarga emesa, reflectida i transmesa que sorgeix dels objectes presents en el camp de visió de la càmera.

³ Llei de Planck: $E_{b,\lambda}(T) d\lambda = C_1 \frac{\lambda^{-5} d\lambda}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$ $E_{b,\lambda}(T)d\lambda$ és el flux [W/m^2] radiat amb longituds d'ona entre λ i $\lambda + d\lambda$, $C_1 = 2\pi^5 h c^2 / 15$ = $3.742 \times 10^8 W\mu m^4/m^2$, la primera constant de radiació $C_2 = hc/k = 1.439 \times 10^4 \mu mK$, la segona constant de radiació h = constant de Planck, c = velocitat de la llum en el buit, k = constant de Boltzmann

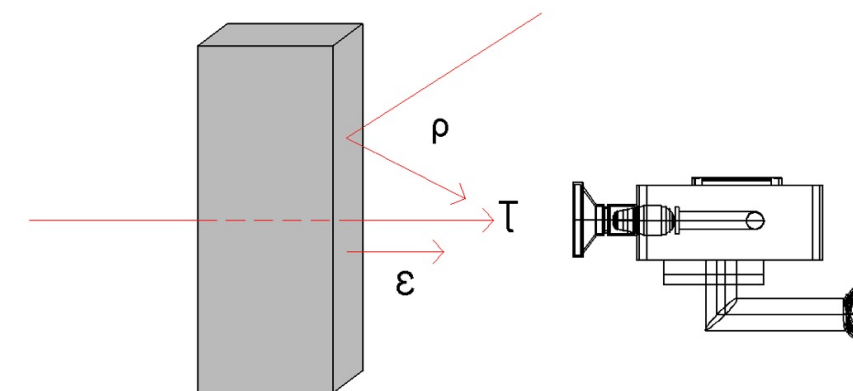
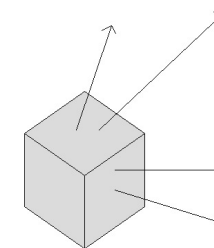


Figura 2.17: Esquema radiació sortint (Font: Elaboració pròpia)

En aquest apartat ens centrem en treballar aquests tres conceptes amb profunditat, ja que es pretén que s'entengui quina radiació estem mesurant, en el moment d'una inspecció termogràfica:

Emissivitat (ϵ):

L'emissivitat (ϵ) és la mesura de la capacitat d'un material d'emetre o propagar radiació infraroja, degut a una diferència de temperatura determinada. És una propietat dels materials que informa sobre la capacitat o eficiència per emetre radiació comparada amb un cos negre a la mateixa temperatura. Es calcula mitjançant:



$$\epsilon = \frac{Pe \text{ (Radiació emesa per una superfície)}}{Po \text{ (Radiació emesa si fos un cos negre)}}$$

Característiques:

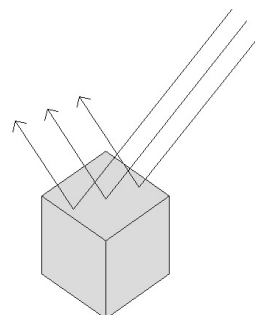
- Varia segons les propietats de la superfície, el material, i en alguns materials segons la temperatura de l'objecte mesurat.
- L'emissivitat màxima és $\epsilon = 1$.
- Cossos reals: $\epsilon < 1$, ja que els cossos reals també reflecteixen i alguns transmeten radiació. Un cos real només absorbeix part de la radiació infraroja incident. Part d'aquesta radiació incident sempre es reflecteix en la superfície i en alguns casos traspassa l'objecte.

- Molts materials no metàl·lics, com per exemple el PVC, el formigó o substàncies orgàniques, tenen una elevada emissivitat en el rang infraroig d'ona llarga, que no depèn de la temperatura. ($\epsilon \approx 0,80$ a $0,95$)
- Els metalls, en especial els que tenen una superfície brillant, tenen una baixa emissivitat que fluctua amb la temperatura.
- L'emissivitat es pot configurar manualment en la càmera o modificar-la posteriorment amb el software corresponent.

Reflexió (ρ):

La reflexió (ρ) és la mesura de la capacitat d'un objecte de reflectir la radiació infraroja. Es calcula amb la següent fórmula:

$$\rho = \frac{\text{Intensitat reflectida}}{\text{Intensitat incident}}$$



Característiques:

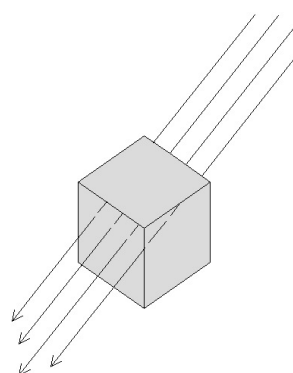
- La reflexió depèn de les propietats de la superfície, la temperatura i el tipus de material.
- Generalment, les superfícies llises i polides reflecteixen més que les superfícies irregulars i sense polir del mateix material.
- La reflexió es pot determinar amb un radiador Lambert.
- L'angle de reflexió de la radiació infraroja reflectida és sempre el mateix que l'angle d'incidència.
- La temperatura de la radiació reflectida es pot configurar manualment amb la càmera termogràfica (RTC).

Transmissió (τ):

La transmissió (τ) és la mesura de la capacitat d'un material de transmetre o permetre el pas de la radiació infraroja.

Característiques:

- La Transmissió (τ) depèn del tipus i gruix del material.



- Molts materials són impermeables a la radiació infraroja d'ona llarga.

Llei de radiació de Kirchhoff's:

Tal i com he citat, el físic Kirchhoff's també juga un paper important en el coneixement de la Termografia.

La radiació infraroja registrada per la càmera termogràfica consisteix en:

- La radiació emesa per l'objecte mesurat.
- La reflexió de la radiació ambient
- La transmissió de radiació del objecte mesurat.

Segons Kirchhoff's, el resultat de la suma dels tres factors és sempre 1:

$$\epsilon + \rho + \tau = 1$$

A la pràctica, la transmissió juga un paper molt petit, i per tant, la fórmula es simplifica:

$$\epsilon + \rho = 1$$

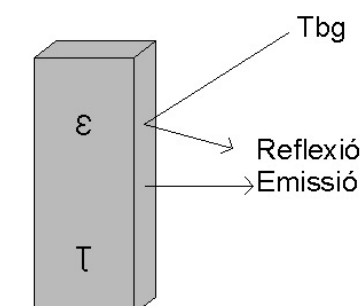


Figura 2.18: Esquema final Llei radiació de Kirchhoff's (Font: Elaboració pròpia)

Amb aquesta fórmula es pot deduir que:

- A menor emissivitat, major proporció de radiació infraroja reflectida
- A menor emissivitat, major dificultat en la presa de mesures precises de temperatura.
- A menor emissivitat, major importància adquireix la configuració correcta de la compensació de la temperatura reflectida (RTC).

Correlació entre emissió i reflexió:

1. La mesura d'objectes amb emissivitat elevada ($\epsilon \geq 0,8$):
 - Presenta un nivell de reflexió baix (ρ): $\rho = 1 - \epsilon$.
 - Es pot mesurar la seva temperatura fàcilment amb la càmera termogràfica.
2. La mesura d'objectes amb emissivitat mitja ($0,6 < \epsilon < 0,8$):
 - Presenta un nivell de reflexió mig (ρ): $\rho = 1 - \epsilon$.
 - Es pot mesurar la seva temperatura fàcilment amb la càmera termogràfica.
3. La mesura d'objectes amb emissivitat baixa ($\epsilon \leq 0,6$):
 - Presenta un nivell de reflexió alt (ρ): $\rho = 1 - \epsilon$.
 - Es pot mesurar la seva temperatura amb la càmera termogràfica, però els resultats s'han de valorar amb precaució.
 - És important ajustar la compensació de temperatura reflectida (RTC) de forma correcta, ja que és un factor molt important pel càlcul de la temperatura.

Dins de la radiació, s'ha de distingir entre dos tipologies de cossos amb propietats diferents:

Cos negre:

Tractant el tema de transmissió de calor per radiació, s'ha de tenir present que no totes les superfícies emeten o absorbeixen la mateixa quantitat d'energia quan s'escalfen a la mateixa temperatura. Un cos que absorbeix i emeti a una temperatura determinada, la màxima quantitat d'energia s'anomena cos negre (veure Fig. 2.18). Un cos negre perfecte, no existeix en la realitat, sinó que és un prototip ideal que s'utilitza com a referència respecte altres radiadors. Aquests cossos es fabriquen per calibrar les càmeres termogràfiques.

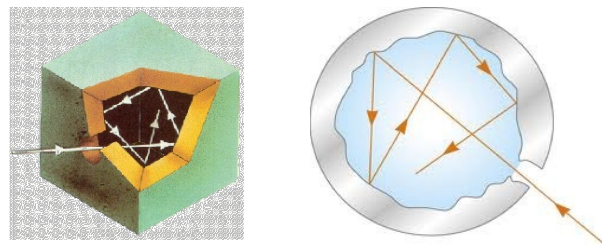


Figura 2.19: Prototip d'un cos negre perfecte (Font: Fenercom)

Quan un cos negre s'escalfa a una temperatura T , la seva superfície emet radiació tèrmica, amb un flux d'energia corresponent a la Llei de Stefan-Boltzmann:

$$H = \sigma \cdot T^4$$

H = quantitat d'energia que emet un cos negre

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ (constant de Stefan-Boltzmann)

T = Temperatura °K ($273 + ^\circ\text{C}$)

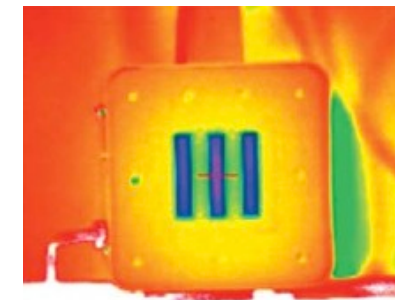


Figura 2.20: Imatge d'un simulador de cos negre (Font: Fenercom)

Cos real:

Són els cossos que troben al nostre voltant, la majoria dels quals són opacs als raigs infrarojos, és a dir, $\tau = 0$, de manera que:

$$\epsilon + \rho = 1$$

Quan un cos real s'escalfa a una temperatura T , la seva superfície emet radiació tèrmica, amb un flux d'energia corresponent a la Llei de Stefan-Boltzmann:

$$H = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$$

H = quantitat d'energia que emet un cos real

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ (constant de Stefan-Boltzmann)

ϵ = Emissivitat

T = Temperatura °K ($273 + ^\circ\text{C}$)

El flux d'energia presenta una distribució espectral, amb un màxim que depèn de la temperatura. La longitud d'ona en la que el flux és màxim, prové de la Llei del desplaçament de Wien, i es calcula amb la següent fórmula:

$$\lambda = \frac{2898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

λ : Longitud d'ona o freqüència (m/k)

T : Temperatura °K

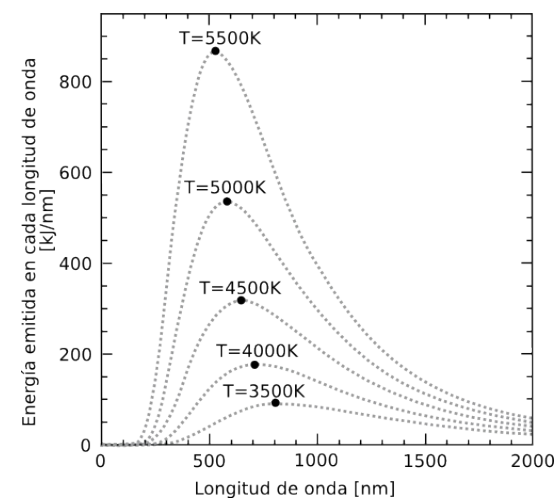


Fig. 2.21: Gràfic d'energia emesa per un objecte a diferents temperatures (Font: el tamiz)

Un cop treballats aquests conceptes físics, cal tenir present que en general la transmissió de calor es pot realitzar de forma simultània per més d'un mecanisme:

En sòlids → per conducció

En líquids → per conducció + convecció

En gasos → Convecció + radiació

Transmissió de calor en superfícies transparents:

El vidre té les següents propietats:

- Alta transmissió a la radiació solar ($\tau = 0,85$ en vidres clars)
- Molt baixa transmissió a la radiació d'ona llarga, és a dir impermeable a la radiació infraroja.

Això pot produir un efecte hivernacle, és a dir, un important increment de temperatura, ja que deixa passar la radiació solar a l'interior, però impedeix la dissipació a l'exterior de la irradiació infraroja de les superfícies calentes de l'interior.

Transmissió de calor en superfícies opaques:

No existeix energia transmesa. Per tant:

$$\tau = 0 \rightarrow \rho + \alpha = 1$$

Si un cos està en equilibri amb el seu entorn, la seva absorptància coincideix amb la seva emitància: $\epsilon = \alpha$

- Cos negre: absorbeix tota la radiació que li arriba ($\epsilon = \alpha = 1$)
- Superfície absorbent : Té una absorptància elevada.
- Superfície reflectant: Té una absorptància reduïda.

En general els coeficients d'absorció i emissió depenen de la longitud d'ona λ de la radiació.

- Superfície gris: Superfície on els seus coeficients són iguals per totes les longituds d'ona.
- Superfícies selectives: Superfícies que canvien bastant els seus coeficients en funció de la longitud d'ona.
 - Superfícies selectives fredes: Són poc absorbents per la radiació d'ona curta i molt bons radiadors per les de ona llarga que emeten a temperatura ambiental. (exemple: superfícies de cal o guix)
 - Superfícies selectives calentes: Tenen les propietats inverses.

2.2 HISTORIA DE LA TERMOGRAFIA

A l'any 1800, Frederick William Herschel nascut a Hannover Alemanya al 1738, descobreix l'existència de la radiació infraroja. Aquest descobriment es produeix accidentalment, durant la investigació d'un nou material òptic. Herschel estava investigant amb la finalitat de trobar un material per a filtres òptics, que aconseguís reduir la lluentor de la imatge del Sol en els telescopis, durant la realització d'observacions solars. Mentre provava diferents mostres de vidres de colors que proporcionaven reduccions similars de lluentor, li va cridar l'atenció que algunes mostres deixaven passar molt poca calor solar, mentre que altres deixaven passar tant la calor, que podien produir danys oculars durant les observacions.

Herschel es va adonar de la necessitat de realitzar un experiment sistemàtic, amb la finalitat de descobrir un material que proporcionés la reducció desitjada de la lluentor, i al mateix temps la màxima reducció possible de calor. Va començar l'experiment amb el prisma de Newton, però buscant l'efecte calorífic en comptes de la distribució visual de la intensitat en l'espectre. En primer lloc, va enfosquir el bulb d'un termòmetre de mercuri amb tinta, i utilitzant-lo com a detector de radiació, va provar l'efecte calorífic dels diferents colors de l'espectre que es formaven a sobre d'una taula, fent passar la llum del Sol a través d'un prisma de vidre. Uns termòmetres col·locats en les afores dels raigs de Sol, servien de control (veure Fig. 2.22).

A mesura que el termòmetre enfosquit, es desplaçava lentament pels colors de l'espectre, les lectures de la temperatura mostraven un increment fixe des de l'extrem lila fins al vermell. Aquest fet no era sorprenent, ja que l'investigador italià Landriani va observar aquest succés en un descobriment realitzat a l'any 1777. No obstant això, va ser Herschel el primer en adonar-se de que havia d'haver un punt, en el que l'efecte calorífic aconseguís el màxim, i que les mesures de la part visible de l'espectre no mostraven aquest nivell. Va moure el termòmetre a la regió fosca, més enllà de l'extrem vermell de l'espectre, i Herschel va confirmar que la calor continuava augmentant. El punt màxim el va trobar més enllà de la zona vermella, dins de la regió que coneixem com a longituds d'ones infraroges. Aquesta nova regió de l'espectre electromagnètic, la va anomenar "espectre termomètric".

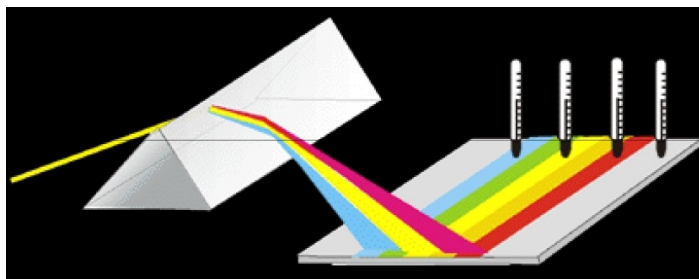


Figura 2.22: Imatge esquemàtica experiment Frederick William Herschel (Font: La enciclopèdia Galàctica)

2.2.1 EVOLUCIÓ DE LA TERMOGRAFIA

Els termòmetres van ser els únics elements de mesura de radiació fins l'any 1829, quan Nobili va inventar el termopar. El termòmetre de Herschel només podia mesurar fins a 0,2 °C i els models posteriors podien mesurar fins a 0,05 °C. Posteriorment es va produir un gran descobriment: Melloni va connectar diferents termopars en sèrie per crear la primera termopila. El nou dispositiu era 40 vegades més sensible a la radiació calorífica que el termòmetre. Era capaç de detectar el calor d'una persona a una distància de 3 metres.

La captura de la primera "imatge de calor" es va ser possible a l'any 1840, com a resultat del treball de Herschel. Basant-se en la diferent evaporació d'una capa fina d'oli, quan l'exposava a un patró de calor enfocat cap a ella, la imatge tèrmica podia veure's gràcies a la llum reflectida en els llocs en els que els efectes d'interferència de la capa d'oli, feia que la imatge fos visible per l'ull humà. Herschel, va aconseguir obtenir un registre primitiu de la imatge tèrmica en paper, i la va anomenar "termografia".

Les millores en la sensibilitat dels detector d'infraroigs, van succeir lentament. L'any 1880, Langley va inventar el bolòmetre, que era un instrument capaç de detectar la calor d'un objecte a un distància de 400 metres.

Els primers sistemes es van desenvolupar durant la guerra de 1914 a 1918, quan els dos bàndols confrontats tenien programes d'investigació dedicats a les aplicacions militars dels infraroigs. Aquests programes, incloïen sistemes experimentals per a la detecció d'intrusions de l'enemic, sensors de temperatura remota, comunicacions segures i projectils guiats. Un sistema de recerca per infraroigs durant aquesta època, va ser capaç de detectar una avió aproximant-se a una distància d'1,5 Km, i una persona a una distància de més de 300 metres.

Els sistemes més sensibles fins a la data, estaven basats en variacions sobre la idea del bolòmetre, però el període d'entreguerres va ser testimoni del desenvolupament de dos nous detectors de raigs infraroigs: el conversor d'imatges i el detector de fotons. Al principi, el conversor d'imatges va ser el que més atenció va rebre per part dels militars, ja que per primera vegada en la història permetia a un observador veure en la foscor. Tot i això, la sensibilitat del conversor d'imatges estava limitada a les longituds d'ona infraroges més properes, i els objectius militars més interessants, per exemple els soldats enemics, havien de ser il·luminats per conjunts de raigs infraroigs de recerca, que partien d'un mateix punt.

Degut a que això, implicava el risc de delatar la posició de l'observador, és comprensible que l'interés militar en el conversor d'imatges es reduís progressivament.

Els desavantatges tàctics per als militars, dels anomenats sistemes tèrmics d'imatge "actius", van proporcionar un impuls després de la guerra de 1939 a 1945, a programes d'investigació militars secrets i més ambiciosos, que tenien l'objectiu de desenvolupar sistemes "passius" (sense raigs lluminosos de recerca) prenent com a base, el detector de fotons. Durant aquest període, les normatives secretes militars evitaven que es revelés l'estat de la tecnologia d'imatges infraroges. Aquest secret, va començar a desaparèixer a mitjans dels anys 50, i des de aquest moment, la ciència i la indústria civil van començar a tenir a la seva disposició, dispositius d'imatges tèrmiques adequats per a les seves necessitats.

Posteriorment a la guerra, a mitjans del segle XX, es van desenvolupar ràpidament els primers sistemes infraroigs, compostos de diferents unitats modulars de gran grandària, que formaven conjunts pesats i difícils d'utilitzar. L'element sensor, era una aliatge de diferents elements com HgCdTe que per efecte fotoelèctric produïen una senyal elèctrica a l'incidir la radiació infraroja sobre ell. L'inconvenient que tenia aquesta tècnica, era que el sensor s'escalfava i es necessitava un sistema paral·lel de refrigeració, que va evolucionar des de els cicles de Stirling mitjançant nitrogen líquid, fins la refrigeració termoelèctrica mitjançant cèl·lules Peltier. L'empresa Sueca AGA, va llançar al mercat la primera càmera termogràfica per a propòsits civils i comercials.

Durant la dècada dels vuitanta, va aparèixer l'altre tecnologia que va revolucionar el món de la mesura de temperatura sense contacte. Es van desenvolupar els sensors d'efecte tèrmic o també anomenats micro-bolòmetres. Aquests, a diferència dels anteriors, utilitzaven l'efecte tèrmic de la radiació infraroja per variar les condicions elèctriques d'una micro-resistència, composta per un material semiconductor, i d'aquesta manera obtenir una senyal proporcional a la potència de l'infraroig rebut. Aquesta tecnologia ja no necessitava refrigeració, i per tant, es va poder reduir la grandària i pes dels sistemes termogràfics.

Molts avanços tècnics, van tenir un progrés important en el camp de la tecnologia informàtica, i l'arribada de la era digital a mitjans dels anys 90, va provocar la ràpida evolució de les càmeres.

La possibilitat de poder adquirir instruments d'elevades prestacions a un preu cada vegada més assequible, va permetre a la termografia accedir a un espectre més ampli d'aplicacions.

2.3 APLICACIONS DE LA TERMOGRAFIA

Des d'un punt de vista més realista, s'ha d'afirmar que no sabem exactament quantes aplicacions pot tenir la Termografia, ja que només amb experimentar un contrast tèrmic, és pot aplicar aquesta tècnica en qualsevol àmbit, i obtenir informació. Tot i això, algunes aplicacions estan més desenvolupades que altres, ja sigui per la importància de la variable de temperatura en aquest procés, o per la rellevància econòmica que tingui. La presència d'aquestes variables fa que la Termografia es trobi en disciplines totalment diferents.

A continuació s'exposen les diferents aplicacions en les quals es pot fer ús de la Termografia, prenent especial atenció a l'aplicació de la Termografia en l'Edificació (enfocament d'aquest projecte):

Agricultura i Geologia:

La reflexió i emissió de radiació dels sòls, està influenciada pel contingut de minerals, químics, humitat, estructura, grandària de les partícules i contingut orgànic del mateix.

Moltes de les aplicacions en aquesta disciplina estan lligades a mesures per satèl·lit, tot i això, també es realitzen mesures amb vols a baixa alçada i mesures a nivell de terreny.

Els minerals i les plantes emeten energia en rangs diferents en l'infraroig tèrmic (MWIR-LWIR), i, també, reflecteixen de forma diferent en el NIR (infraroig proper).

Les aplicacions en agricultura i geologia són innumerables, i com totes les disciplines, les solucions estan lligades en gran mesura a la longitud d'ona de la càmera que s'utilitzi.

Les aplicacions més potencials són:

- Absorció de clorofil·la (que ajuda a la identificació de les diferents espècies de plantes).
- Anàlisi de la distribució de la irrigació de l'aigua i de l'estat de la vegetació.
- Cartografia de les costes, de les zones geològiques i dels límits terra-aigua.
- Comptabilitat d'animals
- Determinació d'estructures de sòls regionals i de la humitat de vegetació i sòl
- Determinació de les condicions del sòl (terra i roques consolidades i no consolidades)
- Localització i seguiment de fonts geotèrmiques i erupcions volcàniques
- Avaluació d'impacte de sequera i evolució de la collita i productivitat

Patrimoni històric-artístic:

La tècnica de la termografia també és aplicada per a localitzar antics tancaments ocults en reformes successives realitzades en un edifici històric. També s'està utilitzant aquesta tècnica per restaurar quadres d'important valor històric.

Anàlisi de la tensió i fatiga:

Quan un cos sòlid es carrega, pot escalfar-se o refredar-se lleugerament depenent si les tensions són de tracció o compressió.

Les càmeres infraroges poden detectar aquestes diferències en la temperatura de l'objecte analitzat.

Les principals aplicacions són:

- Engranatges
- Assaigs no destructius de materials
- Estructures metàl·liques
- Bieles de motors
- Soldadures
- Etc.

Missions de rescat

Les càmeres infraroges tenen diferents aplicacions en l'àrea de la recerca i el rescat. Els humans representem un excel·lent contrast tèrmic en la majoria d'escenaris en els quals habitem. Per aquest motiu, aquesta tècnica es pot aplicar en:

- Cerca i rescat de persones o objectes calents de nit o de dia en zones de camp, muntanya, rius, mars i llacs.
- Cerca de persones entre enderrocs.
- Cerca de persones en pous profunds, aljubs o mines
- Cerca de restes d'un accident d'aviació.
- Rescat, seguretat i vigilància després d'una catàstrofe natural (terratrèmols, inundacions, etc.)

Medi ambient:

En aquesta àrea les inspeccions termogràfiques es realitzen amb helicòpter, avió o satèl·lit. Tot i això, en alguns casos s'utilitzen equips a nivell de terreny, i depenent de l'aplicació s'haurà d'escollir una banda diferent (NIR- MWIR-LWIR).

Algunes de les aplicacions de la Termografia en l'àrea del Medi Ambient són:

- Control de la desforestació
- Control de la contaminació de l'aigua
- Control de descàrrega de gasos calents a l'atmosfera (xemeneies)
- Erosió de les platges
- Meteorologia
- Mesures de trets dels glaciers.
- Temperatura dels oceans.
- Etc.

Electricitat:

L'aplicació més coneguda en la termografia infraroja, són les inspeccions elèctriques. Els problemes en els sistemes elèctrics, estan precedits per canvis en les seves característiques tèrmiques i temperatures. Un termògraf pot identificar els problemes abans que succeeixi la fallida.

Tant en alta tensió com en baixa tensió, el seu desenvolupament en aquest camp ha estat important. Habitualment existeixen sobretensions o diferències de temperatura entre fases, que amb l'ús de la càmera termogràfica, s'eludeix la manipulació del contacte en tensió, evitant d'aquesta manera, el perill de l'usuari i la parada del procés.

A continuació s'exposen totes les aplicacions que es poden realitzar en el sector de l'electricitat, gràcies a la termografia:

- Comprovació de sistemes d'extra baix voltatge, com per exemple: transformadors, relés, terminals i alimentadors.
- Comprovació en sistemes de baix voltatge, com per exemple: resistències, fusibles o motors elèctrics.
- Comprovació en sistemes d'alt voltatge, com per exemple caixes de cables, diferencials, convertidors o aïlladors.
- Manteniment de quadres elèctrics

- Identificació de components i connexions defectuoses
- Manteniment de línies i torres d'alta tensió o subestacions.
- Monitorització de el calor generada en components elèctrics, fusibles o circuits impresos.

Instal·lacions mecàniques

La termografia infraroja constitueix un mètode imprescindible per a la reducció de costos de manteniment en els equips mecànics, i és un factor crític en la confiabilitat operacional de les instal·lacions industrials i comercials.

Tots els equips electrònics i mecànics, tenen un límit en la seva temperatura operacional. La termografia infraroja permet la visualització dels rangs de temperatura quan l'equip està en servei i en funció. Aquesta tècnica pot ser utilitzada en diferents equips incloent sistemes electrònics, bombes, motors, etc.

La temperatura dels diferents elements mecànics pot permetre realitzar un diagnòstic i seguiment del seu funcionament, per evitar possibles problemes en el futur. La termografia ens permet realitzar:

- Manteniment preventiu de plantes i màquines mentre estan en funcionament.
- Comprovació de motors, coixinets, bombes i eixos.
- Monitorització d'aïllaments tècnics, com per exemple: en canonades de vapor calent o forns.
- Comprovació de la temperatura en motors i rodaments.
- Monitorització del nivell en tanques, depòsits, etc.
- Comprovacions en la producció de motlles per injecció de plàstic.
- Monitorització de processos, com per exemple: a la indústria siderúrgica.
- Problemes de fricció

Automoció

En vehicles es pot comprovar la temperatura que aconsegueixen els discos després d'una frenada. També es pot analitzar la distribució de la calefacció dels seients o comprovar l'aïllament del vehicle.

Control de plagues

Es poden localitzar les galeries que deixen els tèrmits en la fusta, ja que aquests són buits d'aire, els quals queden de manifest en la termografia degut a la diferència de temperatura de la fusta.

Manteniment preventiu

En el marc industrial, l'aplicació de la termografia en l'àrea del manteniment és molt important, especialment el manteniment anomenat "Predictiu" i també el manteniment "Proactiu".

La termografia infraroja, en aquest camp es complementa eficientment com altres assajos de manteniment, tals com l'anàlisi de lubricants, l'anàlisi de vibracions, l'ultrasò passiu, etc.

De totes les tecnologies relacionades amb el manteniment, la Termografia Infraroja és la que es troba més vinculada a la seguretat d'una instal·lació. Abans de produir-se una fallida, aquesta és manifesta generant calor, o pèrdues de fred. L'objectiu és poder detectar prèviament les falles que poden produir-se. Això significa reduir costos ocults, reduir pòlisses de segurs i pòlisses del personal en l'àrea dels accidents laborals, com també reduir els costos de manteniment, ja que es poden organitzar les tasques pensant en un futur i tractant de disminuir les reparacions diàries, que són molt costoses.

La implantació de la termografia en l'àrea de manteniment, també té un benefici indirecte sobre l'àrea de la producció i la qualitat: menys parades no programades, significa major productivitat i també uniformitat en el producte.

Les àrees d'aplicació de la termografia en el manteniment industrial són:

- Instal·lacions elèctriques en general
- Connexions, Cables
- Línies de baixa, mitja i alta tensió
- Transformadors de tensió, potencia i de corrent
- Interruptors
- Instal·lacions mecàniques-reductors
- Pèrdues en condensadors
- Aïllants i refractaris
- Bombes d'aigua
- Etc.

Termografia aèria

Les inspeccions aèries amb càmeres infraroges, tant amb helicòpters o avions, serveixen per a la detecció de danys i filtracions en terrats i sostres, pèrdues en canonades de vapor, detecció de mines i bombes, seguiment de la vida d'animals salvatges, i el control del Medi ambient (sortida de fluxos de líquids Industrials). Les inspeccions aèries també estan relacionades amb temes de rescat, seguretat i vigilància.

Cobertura de Televisió

Actualment en el món competitiu de les notícies, existeix la possibilitat de donar un valor afegit a l'audiència instal·lant en un helicòpter, vaixell o vehicle, una càmera termogràfica. La mateixa càmera, pot proporcionar a una determinada audiència, informació addicional d'un esdeveniment d'interès periodístic.

Aquesta imatge infraroja representativa, pot ser transmesa i visualitzada en les cases, com una imatge de vídeo visible representativa de la radiació infraroja que emet l'escena.

Medicina i veterinària

El valor clínic de la termografia es dirigeix a la sensibilitat de la patologia en els sistemes vasculars, musculars, nerviós i ossi. La termografia aplicada a la medicina humana s'està utilitzant durant els últims 20 anys en Estats Units, Europa i Àsia.

Algunes de les principals aplicacions en el camp de la medicina són:

- Oncologia
- Disfuncions respiratòries
- Desordres digestius
- Desordres cardiovasculars i circulatoris
- Disfuncions del sistema limfàtic
- Patologia dels pits
- Etc.

Les càmeres infraroges s'estan utilitzant a Àsia com una de les mesures preventives per un primer control dels potencials portadors de SARS (epidèmia). Aquests, es troben especialment en els aeroports. La demanda de càmeres en aquesta regió s'ha fomentat dràsticament en els últims temps. La termografia, és utilitzada per monitoritzar la cara de les persones abans de pujar a un avió, entrar en un hospital, en edificis públics, etc. determinant ràpidament el perfil tèrmic de la persona controlada.

Existeix una línia aèria (Cathay Pacific) de les més important d'Àsia, que no permet la pujada als seus vols de passatgers amb una febre de 37,5°C o superior. El control d'aquesta febre es realitza a través de la termografia. És a dir, amb una càmera infraroja i un software corresponent s'avalua i es mesura la distribució de temperatura en la cara o pell d'una persona.

Aquest, és un mètode ràpid, no invasiu, sense contacte que quantifica canvis en la temperatura. de la superfície de la pell, en temps real, amb precisions que oscil·len entre 0,5-0,3 °C.

En l'àmbit de la veterinària, la termografia també s'utilitza per visualitzar i quantificar canvis de temperatura de la superfície de la pell. La calor que emet un animal pot veure's amb una càmera infraroja. Els rangs de calor que es projecten, ajuden al veterinari a detectar si el flux sanguini de l'animal es normal o no. El flux sanguini s'incrementa o disminueix, i es pot observar si existeixen problemes de salut, com inflamacions, lesions musculars, inflamació en les articulacions, tendons, etc. Aquesta calor fluctua a través del cos segons el flux sanguini, i aquest es regula a un cert grau, segons necessitats. Per exemple, els teixits danyats necessiten major flux sanguini per a la creació de cèl·lules sanes i així recuperar-se, fet que es pot observar en un termograma.

Espai i Astronomia:

En l'espai, la termografia té diferents tipus d'aplicacions: tant meteorològiques, com control remot, com control Científic-Militar.

Seguretat i Vigilància:

Les càmeres infraroges tenen moltes aplicacions en l'àrea de la seguretat i vigilància.

Els humans representem un contrast tèrmic excel·lent en la majoria dels escenaris en els que habitem (tant de dia com de nit). La temperatura corporal de 36,6°C (309,76 Kelvin), contra els 14,84°C (288 Kelvin) diürna-nocturna de mitjana de la terra, representa un gradient tèrmic per poder distingir i buscar una persona en múltiples escenaris.

El gran avanç de la tecnologia per infrarojos, junt amb una reducció dels costos d'una forma significativa, ha popularitzat la seva utilització en una gran varietat de sectors d'alta seguretat, des de l'ús militar tradicional a un ús civil més divers. Les entitats públiques i privades van incorporant la termografia com a complement i alternativa a tècniques tradicionals per reforçar els estàndards de seguretat. Aquestes aplicacions són:

Forces de Seguretat:

La capacitat de visió en intervencions d'unitats militars i policials és imprescindible. Les càmeres tèrmiques ofereixen un potencial addicional d'observació en condicions nocturnes i de baixa visibilitat, a la vegada que un difícil camuflatge enfront de determinades situacions.

Vigilància de costes i fronteres:

Per aquests entorns, es demanen capacitats màximes d'observació i detecció.

Entorns de baixa visibilitat:

Determinats entorns com túnels, galeries, vials de servei, estacions de proveïment i comunicacions, etc. Estan subjectes de forma temporal o continua, a condicions de baixa lluminositat. Tot i això, per preservar la seva integritat i mantenir el seu servei, és necessari el manteniment per garantir el seu servei de forma permanent.

Seguretat fronterera:

Protegir les fronteres d'un país és necessari per la seguretat nacional. Les càmeres termogràfiques poden ajudar als professionals de control de fronteres, a satisfer les necessitats de seguretat a les que es troben de nit i/o en situacions de poca il·luminació. Les càmeres tèrmiques poden integrar-se en projectes de seguretat de fronteres amb radars i altres sensors.

L'ús de les càmeres termogràfiques està molt extens en el camp de la seguretat en fronteres. Gràcies a la seva capacitat de detecció d'objectius de dimensions humanes a varis quilòmetres de distància, són utilitzades per aquests treballs de vigilància i protecció de fronteres.

Protecció contra incendis:

Enfront un incendi en un entorn industrial, urbà o rural, la detecció avançada, és la millor eina per minimitzar riscos i pèrdues. Les càmeres d'infrarojos ajuden a visualitzar al bomber a través de núvols de fum, boira i en la foscor, ajuden a localitzar les flames, indica la zona on l'aigua està refrigerant, poden veure núvols tòxics i la seva direcció, identifiquen àrees potencial de reincendi, etc.

Forenses:

En peritatges en accidents de trànsit, amb aquesta tècnica es pot determinar per exemple, la calor dissipada per una drenada en un accident, o qualsevol altre indici no visible per l'ull humà que ajudi a resoldre la causa de l'accident. També serveix per la detecció de taques de sang en parets esborrades després d'un crim, alteració i/o falsificació de documents i diners.

Detecció de gasos:

La càmera infraroja detecta 80 tipus de gasos diferents (butà, diòxid de sulfur, propà, etc.). Aquest sistema de detecció de gasos presenta un avantatge considerable respecte a altres tècniques utilitzades per detectar pèrdues o emissions de gasos. La termografia en aquest camp, permet que

l'operari no es trobi a prop de la font, sinó que amb la càmera infraroja, aquest pot visualitzar les mateixes pèrdues a una distància de 30 m.

Aïllaments i refractaris:

Amb la Termografia infraroja es pot determinar l'estat global d'aïllaments, tant en aplicacions en fred com en calor. Aquesta tècnica permet reduir considerablement les pèrdues energètiques, així com anticipar-se per solucionar un problema de manera que s'aconsegueixi un estalvi econòmic. Tot i això, amb una càmera termogràfica, no només es visualitza la capacitat aïllant dels materials, sinó que també es verifica la qualitat del disseny, i la posada en obra sobre el component.

Cal destacar que la detecció de fuites en aïllaments i refractaris, és una de les aplicacions industrials més profanes de l'infraroig tèrmic.

Les aplicacions amb Termografia en temes de pèrdues de calor o fred es realitzen en:

- Calderes, xemeneies i conductes de refrigeració
- Càmera de conservació de productes congelats, refredats i càmeres frigorífiques
- Forns de processat, rotatoris i reactors
- Intercanviadors i furgons tèrmics
- Reactors, recipients aïllats, sistema de calefacció i refrigeració
- Conductes de calor i fred
- Edificis
- Etc.

Les aplicacions amb Termografia en materials relacionats amb l'aïllament:

- Ciments aïllants (silicat de sodi, vermiculita, etc.)
- Ceràmics
- Escuma de Poliestirè
- Fibres ceràmiques
- Formigons refractaris i aïllants
- Maons refractaris
- Llana de vidre, minera i polímers escumats
- Poliuretà injectat / expandit

Electrònica i components:

Les càmeres infraroges en aquest camp, són utilitzades tant en l'àrea de producció com en diagnòstic. Aquestes, tenen la capacitat de veure objectes petits i de formes irregulars, i determinar les característiques tèrmiques del mateix. Això suposa pels tècnics un benefici, ja que determinen ràpidament problemes elèctrics en els seus productes, i augmenten l'eficiència de la producció.

Les aplicacions de la Termografia en aquesta àrea són:

- Producció de plaques de circuit imprès
- Connexió de cables en circuits integrats
- Etc.

Control de qualitat de productes:

La Termografia també s'utilitza en cadenes de muntatge o fabricació de components, per comprovar un resultat final correcte.

Energies renovables:

Les diferents plantes d'energia com la biomassa, el carbó, el gas, etc. presenten un alt perill d'incendi. Mitjançant la Termografia infraroja, es pot detectar aquest incendi, abans que sigui de major magnitud. Amb la termografia, els defectes ocults de diferents materials poden ser detectats.

Energia eòlica:

- Comprovació de buits o errors en l'estructura de les pales.
- Revisió de les pales en els parcs eòlics, comprovant que no es trobin en males condicions degut a les condicions climàtiques.
- Vigilància de l'emmagatzematge del material.

Energia solar:

- Controlar el procés de fabricació abans i després de la laminació de les cèl·lules fotovoltaïques.
- Comprovar l'intercanvi de líquids en les cèl·lules tèrmiques.

- Manteniment de les plaques, verificant que no existeix una cèl·lula morta que disminueixi el rendiment de la placa.
- Identificació d'esquerdes.
- Detecció de defectes en soldadura o en juntes.
- Visualització de corrosió i oxidació en xapes de metall.
- Identificació de forats interns, bombolles i filtracions d'aire.

Diagnòstic en l'Edificació:

Les aplicacions en edificació s'exposaran detalladament, ja que fan referència al tema que tracta aquest projecte.

Una edificació amb un manteniment deficient, ocasiona als seus ocupants i propietaris un alt nivell de desconfort, un consum excessiu d'energia, i alts costos operacionals.

Per aconseguir un alt grau de confiabilitat, menors costos de manteniment i reducció del consum d'energia, podem fer ús de la Termografia, la qual ajudarà a la:

- Investigació de l'eficiència energètica dels tancaments
- Comprovacions prèvies i posteriors a la rehabilitació d'un edifici
- Localització de ponts tèrmics
- Comprovació d'aïllaments
- Detecció de fuites en canonades de calefacció
- Localització de l'entramat de les canonades en parets o terres radiant.
- Establiment dels danys per humitat
- Valoració dels riscos per condensació
- Monitorització de l'assecat dels materials de construcció
- Localització de les zones per on travessa la humitat.

Localització de fuites:

La Termografia és una eina molt útil per a la detecció i comprovació de fuites en canonades i conduccions, inclús si es troben soterrades o en parets. Es poden detectar fuites en calefaccions de terra radiant o en sistemes de calefacció comunitària. Poder determinar la localització exacta de les fuites, evita excavacions innecessàries i l'estalvi de costos.

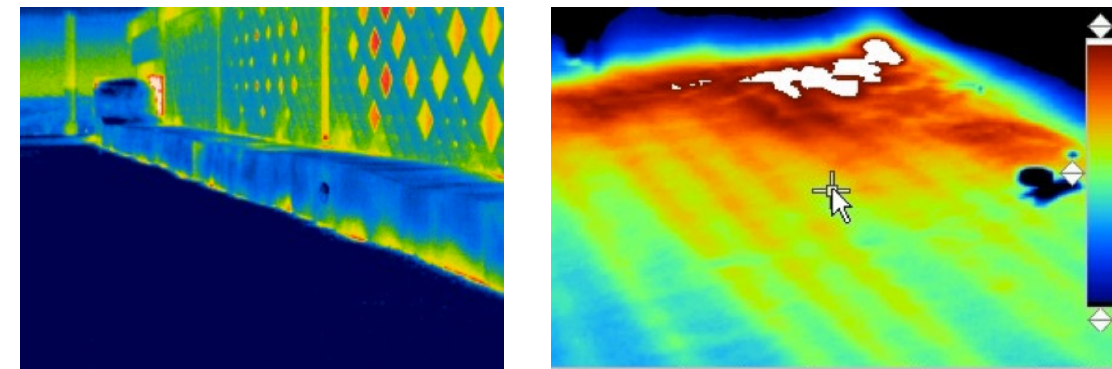


Figura 2.23 i Figura 2.24: Pèrdues d'energia a través de la canalització. (Font: G. SANGLIER). I ubicació exacta d'una fuga en terra radiant, que va permetre al tècnic localitzar ràpidament l'àrea que havia de tractar. (Font: RCi)

Detecció de defectes de construcció:

La Termografia és el mètode més ràpid per detectar possibles defectes de construcció. Amb aquesta tècnica es pot comprovar si l'execució de la obra ha estat correcta. Aquesta tècnica visualitza les pèrdues energètiques, humitats i fuites d'aire mitjançant imatges a color.

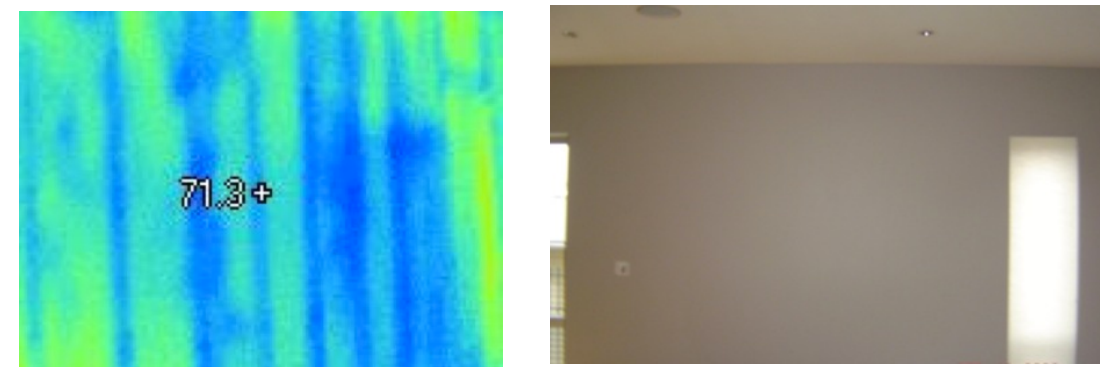


Figura 2.25: En aquesta paret existeixen humitats que a simple vista no s'aprecien (Font: RCi)

Inspecció dels procediments d'assecat:

Quan es localitza una fuga, el següent pas és reparar-la assecant la zona afectada. Per poder assecat una filtració d'aigua, s'han de realitzar perforacions que ajudin a que circuli l'aire. Per evitar danys en les canonades existents i crear noves fuites, s'utilitzen les càmeres termogràfiques per a la seva localització. Tanmateix podem comprovar el progrés i l'èxit de l'assecat.

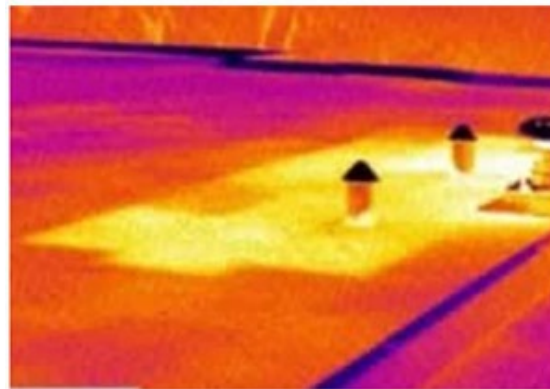


Figura 2.26: Control del procés d'assecat d'una solera de formigó. (Font: Vivainnova)

Plans de reurbanització i garantia de qualitat:

La termografia d'infraroigs no s'aplica només durant els plans de reurbanització, sinó també com a garantia de qualitat en la inspecció de noves construccions. En l'assecat de les obres, la imatge tèrmica permet comprovar l'avanç dels processos d'assecat i optimitzar els terminis de temps, agilitzant els processos de les obres.



Figura 2.27: Imatge termogràfica d'una vivenda d'obra nova (Font: Inserma Ingenieros)

Visualització de pèrdues energètiques:

Els ponts tèrmics són una pèrdua d'elements, a més d'un focus on es poden produir condensacions. A conseqüència d'aquest fet, poden aparèixer floridures, que provoquen un risc als usuaris. A més, els ponts tèrmic també actuen en alguns casos com a ponts acústics. La termografia infraroja, detecta immediatament aquestes deficiències.

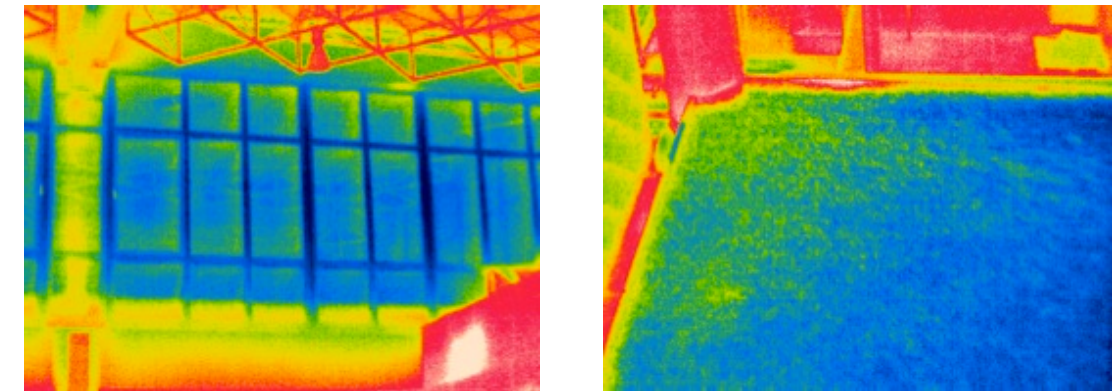


Figura 2.28 i Figura 2.29: Ponts tèrmics en els panells envidriat i en la columna (Font: G. SANGIER)

Restauració d'edificis:

La termografia ofereix informació important durant la restauració d'edificis i monuments. Els entramats de les construccions que es troben ocults, es poden veure en les imatges infraroges, i es pot decidir per exemple, si té sentit eliminar un arrebossat. També es poden detectar amb precedent, desprendiments d'arrebossat en les parets, i d'aquesta manera poder prendre les mesures necessàries per a la seva conservació.

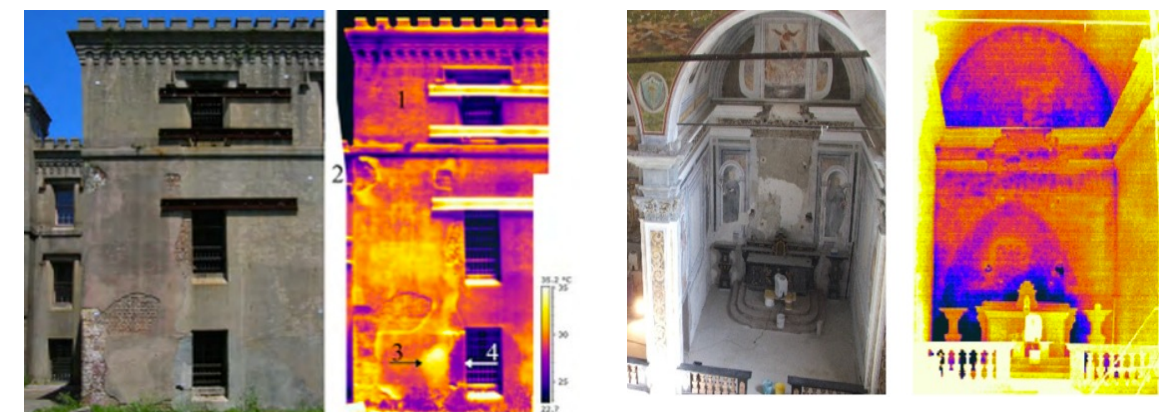


Figura 2.30 i Figura 2.31: Façana Oest Old City Jail, Charleston, South Carolina (USA). I absis del santuari Lavello a Calolziocorte (Font: Elisabetta Rosina)

Detecció de fuites d'aire:

Una altre aplicació, és la detecció de fuites d'aire mitjançant la identificació de la seva taxa d'intercanvi. Per realitzar aquest procés, s'utilitza el procediment Blower-Door. En aquest procés, es genera una baixa pressió en l'edifici per forçar que l'aire exterior, a elevada pressió, penetri per les zones que no estigui segellades correctament. Aquest flux d'aire, pot observar-se amb una càmera termogràfica. Un cop identificades les fuites, es poden reparar abans de que els revestiments facin més costosa

l'eliminació d'un defecte de construcció.

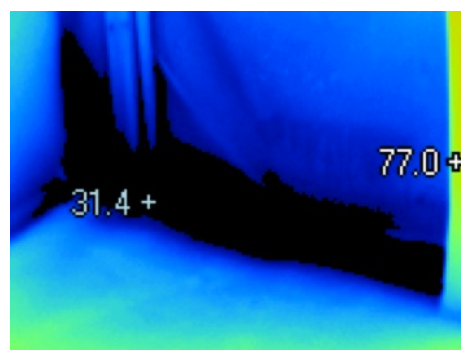


Figura 2.32: Imatge de fuga d'aire degut a l'absència d'aïllament i segellament. (Font: RCi)

Detecció de fuites en teulades de coberta plana:

Avaluar les filtracions d'aigua en teulades de coberta plana, és una altre aplicació comú. L'aigua reté la calor durant més temps que la resta de materials de la teulada, podent-se detectar amb la càmera termogràfica un cop refredada la teulada. Es poden reduir els costos de reparació identificant les zones humides amb problemes, en comptes de reemplaçar tota la teulada.

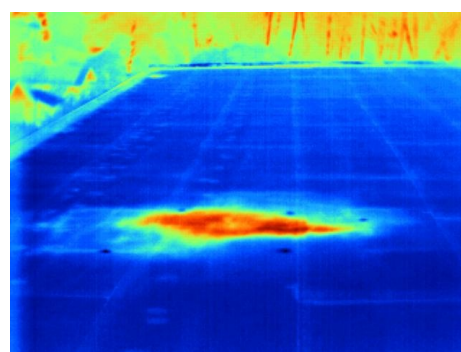


Figura 2.33: Imatge on s'observa un aïllament deficient en una zona de la coberta (Font: RCi)

Calefacció, ventilació i aire condicionat:

L'ambient interior té un efecte considerable sobre la nostra sensació de benestar i el nostre rendiment. Les baixes laborals per malaltia en una empresa poden ser degudes en part a causa d'unes condicions ambientals interiors deficientes. La termografia pot oferir la informació necessària sobre l'estat de les sortides d'aire condicionat, radiadors o sistemes de ventilació. La informació que proporciona la càmera termogràfica, permet optimitzar els ambients de treball i evitar zones exposades a corrents d'aire.

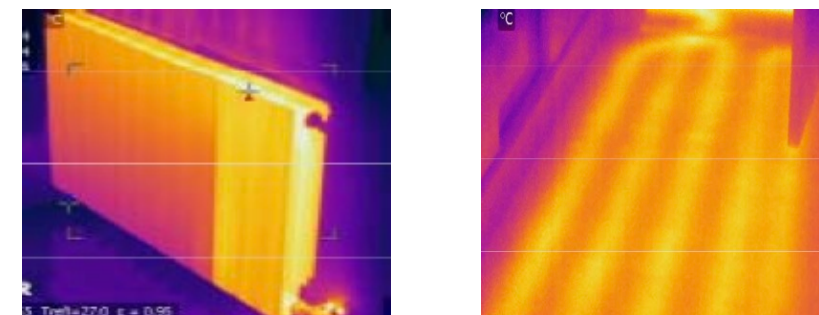


Figura 2.34 i Figura 2.35: Inspecció de radiadors i terra radiant (Font: Grupo Energia y Edificación)

Protecció contra incendis:

Gràcies a la termografia es poden detectar les esquerdes, les fuites, els maons mal posicionats en xemeneies i els sistemes de sortida de gasos en instal·lacions de calefacció. Amb aquesta tècnica es poden determinar les zones sobre escalfades que poden provocar incendis en xemeneies, així com la detecció de riscos d'incendis per excessiva proximitat a zones de calefacció o sortida de gasos.

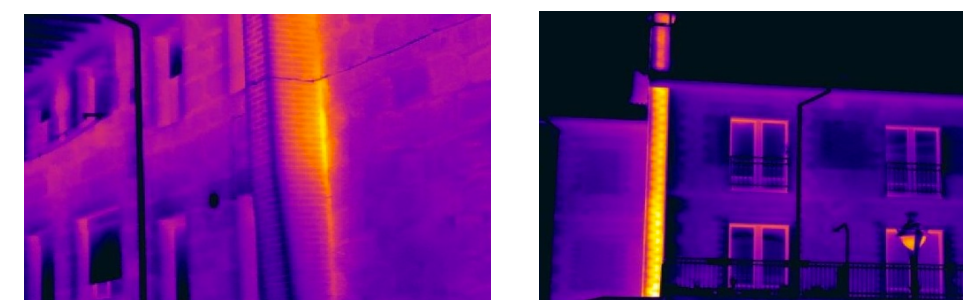


Figura 2.36 i Figura 2.37: Pèrdues d'energia en el conducte de la xemeneia. (Font: Terma Graf)

Prevenició a les floridures:

Les floridures no afecten només a les construccions, sinó que també suposen un risc per la salut i provoquen al·lèrgies als ocupants. Les espores de les floridures tenen les millors condicions de creixement quan la humitat de l'aire ambient es reuneix i arriba a precipitar-se en forma de gotes. Tant les substàncies minerals de la paret com els papers pintats, són excel·lents medis de cultiu per als fongs. Les càmeres termogràfiques visualitzen els punts de condensació.



Figura 2.38: Condensació provocada per l'aire fred exterior i l'aire humit interior, causant floridures (Font: RCi)

2.4 MARC NORMATIU

En un projecte sobre Termografia infraroja, s'ha de presentar el tema legislatiu, i exposar quin paper juga dins d'una inspecció Termogràfica.

Existeixen algunes normes UNE i ASTM, que ajuden a posar en marxa l'aplicació i la realització d'aquest tipus d'estudis en el camp de l'edificació.

Actualment a l'Estat Espanyol, no existeix una normativa que reguli l'ús de la Termografia infraroja aplicada al sector de l'Edificació. Tot i això, hem agafat de referència, normatives d'organismes internacionals i altres països, que ens guien sobre com gestionar el tema de la Termografia en els edificis. Aquestes normatives i directrius es troben agrupades en dos conjunts principals, que consisteixen en requisits sobre les especificacions tècniques de les càmeres termogràfiques, i especificacions per a la formació i qualificació del personal que utilitza la Termografia. Aquestes normatives són:

- ISO EN 13187:1999 (1999)
- UNE- EN- 13829: 2002 (2002)
- ASTM C1153-97 (2003)
- ASTM C1060-90 (2003)
- ASTM C1046-95 (2007)

A continuació s'exposa de forma resumida el contingut d'aquestes normatives, que seran utilitzades com a referència vers aquest projecte, i el qual s'ha extret de la consulta de les normatives en format original.

2.4.1 ISO EN 13187:1999 (1999)

Es va desenvolupar a Europa, però actualment és acceptada com una norma ISO internacional. Existeixen adaptacions de la mateixa norma en països europeus com Regne Unit, Suècia, etc.

Aquesta norma especifica què i com es precisa fer, per realitzar una inspecció termogràfica d'edificis. També estableix la informació mínima que ha d'incloure un informe termogràfic d'edificació: dades de l'equip utilitzat, dades i qualificació del termògraf, dades ambientals, anàlisis i resultats, etc.

Determina un mètode qualitatiu, per detectar irregularitats tèrmiques en la pell dels edificis. També s'utilitza per determinar la ubicació de les irregularitats tèrmiques i la localització de recorreguts de fuites d'aire al llarg dels tancaments. Aquesta norma, no s'aplica a la determinació del grau d'aïllament tèrmic i estanquitat de l'estructura, ja que aquestes determinacions precisen d'exàmens específics amb altres mètodes.

Requisits generals de prova que especifica la normativa ISO EN13187, que es necessiten considerar en una inspecció termogràfica:

- a) Les especificacions i capacitats de l'equip termogràfic.
- b) Les característiques del tancament de l'edifici. Per exemple els diferents tipus i ubicacions dels sistemes de calefacció, elements estructurals i capes d'aïllament.
- c) Les propietats radiants de la superfície, per exemple els materials del revestiment.
- d) Factors climàtics.
- e) Accessibilitat per a una fàcil inspecció.
- f) Influències de l'entorn.
- g) Altres factors d'importància.

En aquesta normativa també s'especifiquen dues formes de termografia:

- Verificació amb una càmera IR: es dirigeix principalment a la inspecció de l'eficiència general dels edificis nous o edificis que han estat rehabilitats.

- Verificació simplificada amb una càmera IR: quan es realitzen auditories (avaluacions). Per exemple en obra durant una rehabilitació, o en el procés de control o durant altres períodes d'inspecció.

Aquestes dues adaptacions es diferencien, principalment pel que fa a la comunicació i presentació dels resultats. Els resultats obtinguts per mitjà d'aquest mètode han de ser interpretats i avaluats per les persones que estan especialment entrenades/preparades per a aquesta finalitat. La normativa ISO EN 13187 1999 és una modificació/ampliació de la normativa ISO 6781:1983

2.4.2 UNE- EN- 13829: 2002

Aquesta normativa estableix el procediment de mesura del volum d'infiltracions d'aire d'un edifici, mitjançant el sistema de blower-door (es tracta d'un ventilador associat a un software específic i l'ús de la Termografia, amb el que s'avalua l'estanqueïtat de l'envolvent de l'edifici).

2.4.3 ASTM C1153-97 (2003)

La normativa C1153-97 defineix les tècniques que necessiten imatges infraroges durant la nit, per determinar la localització de l'aïllament mullat, en sistemes de sostres, que tenen l'aïllament per sobre de la coberta i en contacte amb la impermeabilització. A més, estudia les diferències dels materials i les condicions dels sostres, els procediments a duu a terme, les qualificacions del termògraf, i les pràctiques operatives.

Aquesta pràctica tracta els criteris necessaris per a l'ús d'equips infrarojos, tals com la diferència de temperatura mínima resoluble, el rang espectral, el camp de visió instantani, etc. També es tenen presents les condicions meteorològiques en les quals es realitzen les inspeccions infraroges.

La normativa també inclou inspeccions terrestres i aèries, dedicant especial atenció a la seguretat del termògraf.

2.4.4 ASTM C1060-90 (2003)

La normativa C1060-90 defineix com realitzar un ús adequat dels sistemes d'infrarojos, per a la realització d'inspeccions qualitatives tèrmiques dels edificis, parets, sostres, pisos, emmarcats en fusta o metall, que poden contenir l'aïllament en els espais entre peces del marc, etc.

Aquest procés permet la detecció de zones on l'aïllament és inadequat, i permet identificar les zones que aparentment tenen un aïllament correcte. També ens ofereix un mètode per a la detecció de la pèrdua de l'aïllament, i la possibilitat de detectar el gruix parcial del mateix, l'aïllament que està col·locat de manera incorrecta, o l'aïllament deteriorat degut a l'ús.

En aquesta norma també es descriuen els requisits d'instrumentació, calibratge i els procediments de mesura que s'han de tenir en compte per a realitzar les inspeccions termogràfiques, tant a l'exterior

com a l'interior, i el ventall d'alteracions que poden tenir aquests requisits, en funció de les condicions ambientals.

2.4.5 ASTM C1046-95 (2007)

La normativa C1046-95 defineix la tècnica per a l'ús de transductors de flux de calor (HFTS) i transductors de temperatura (TTS) en els amidaments del comportament tèrmic dinàmic in-situ, i l'estat d'equilibri dels components opacs de l'envolvent dels edificis.

Les sol·licituds d'aquestes dades inclouen la determinació de resistències termals o de les constants de temps tèrmic. La norma també aplica la termografia infraroja, en cas de desconeixement de les característiques del subsòl, per localitzar els llocs apropiats per col·locar els HFTS i TT.

La normativa europea de referència resulta un marc competent per a la realització de les inspeccions, ja que les característiques pròpies de la climatologia, la composició de façanes, les condicions locals de cada zona, etc. fan necessari, el desenvolupament de recomanacions específiques referents a la metodologia d'inspecció, amb la finalitat de facilitar els treballs i afavorir la recerca de les condicions idònies, que permetin la detecció d'anomalies amb un major grau de fiabilitat.

2.5 LA CÀMERA TERMOGRÀFICA

Aquest apartat es centra en treballar detalladament amb els equips que permeten obtenir els termogrames, que són les càmeres termogràfiques.

2.5.1 COM FUNCIONA LA CÀMERA TERMOGRÀFICA?

La òptica d'una càmera dirigeix cap al seu detector la radiació infraroja que emet l'objecte d'estudi, obtenint una resposta (canvi de tensió o resistència elèctrica) que serà llegida pels elements electrònics (la placa electrònica) de la càmera. Aquesta senyal electrònica és convertida en una imatge electrònica en la pantalla, on les diferents tonalitats de color corresponen a distintes senyals de radiació infraroja procedents de l'objecte d'estudi.

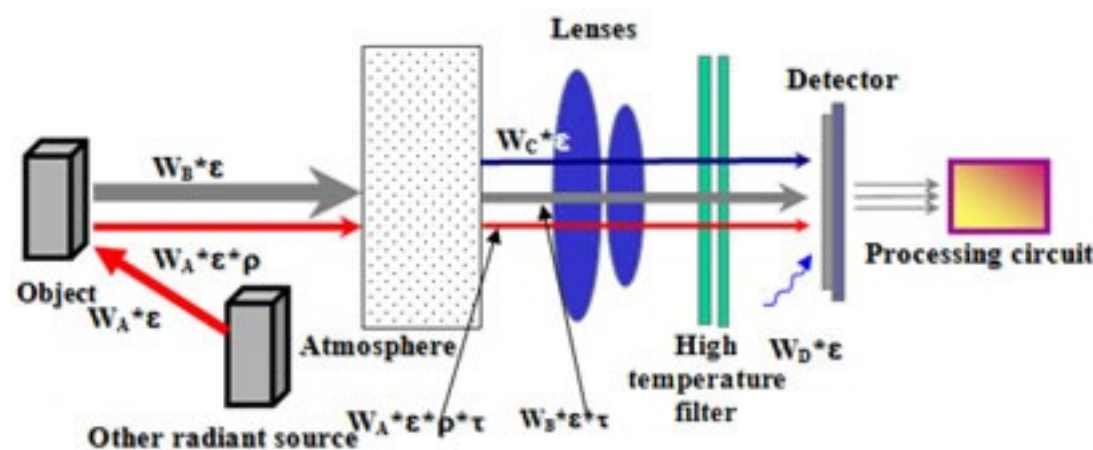


Figura 2.39: Procés de funcionament de la càmera termogràfica (Font: Amperis)

Les característiques a tenir en compte abans d'escollir una càmera són:

- Que ofereixi resultats precisos i exactes. La precisió indica el marge d'error en graus en el moment de llegir la imatge. Quant més petits són els graus de precisió, més fiable és la lectura del termograma.
- La resolució: el número de píxels (més píxels significa més detall i nitidesa de la imatge).
- Detector d'alta resolució i qualitat d'imatge. La resolució espacial és un concepte que defineix fins a quina distància es podran veure els objectes, és a dir, és la relació entre la grandària del sensor i la distància entre les lents i el sensor. Contra més baixa és la resolució espacial, a més distància es podrà utilitzar la càmera, o per la mateixa distància es podran visualitzar objectes més petits.
- La grandària de la pantalla.
- La capacitat de diferenciació de cada increment de temperatura.

- Amplitud de l'espectre infraroig que és capaç d'abastar.
- Distància fins a la qual és capaç de mesurar l'equip.
- La freqüència de refrigeració, que ens diu la velocitat a la qual la càmera és capaç d'observar l'objecte per segon.
- El software que l'acompanya.
- La capacitat d'emmagatzematge i tipus de suport d'emmagatzematge, i d'exportació de dades en formats Standard.
- Amb punter làser integrat, que ajudi a posicionar la càmera en el punt exacte d'anàlisi.
- Ergonòmica per un ús prolongat o freqüent.

2.5.2 CALIBRATGE DE LA CÀMERA TERMOGRÀFICA

Una càmera termogràfica ha d'estar calibrada. El calibratge significa comparar i no ajustar.

S'ha d'exigir el Certificat de Calibratge de la càmera, amb el seu model de càmera, el número de sèrie i la data de calibratge. És recomanable realitzar aquest procediment un cop a l'any si el seu ús és habitual.

Aquest procés, es realitza en laboratoris acreditats, en condicions controlades de temperatura i humitat, amb un simulador de cos negre. S'agafen cinc punts, més el punt central i es comença a mesurar. Si la corba en la que es relaciona la radiació rebuda amb la temperatura (que cada càmera té en la seva electrònica), està desajustada, és necessari reparar l'equip.

2.5.3 SENSIBILITAT D'UNA CÀMERA TERMOGRÀFICA (RESOLUCIÓ)

La resolució afecta a la claredat amb la que es pot veure una imatge, i aquesta ajudarà a distingir la font del problema més fàcilment. Això en termografia dependrà de diferents factors, com el disseny del detector, de la qualitat de la òptica utilitzada i del número de píxels que és capaç de generar una imatge.

En el mercat existeix una àmplia gamma de resolucions, de les quals és important seleccionar-les correctament per no fer una despesa innecessària, per excés o per defecte. A l'annex 8 s'exposa una taula amb les característiques de diferents càmeres termogràfiques segons la marca comercial.

A continuació es presenta un exemple d'una imatge termogràfica presa des del mateix punt i mateixa hora, però amb càmeres de diferent resolució:

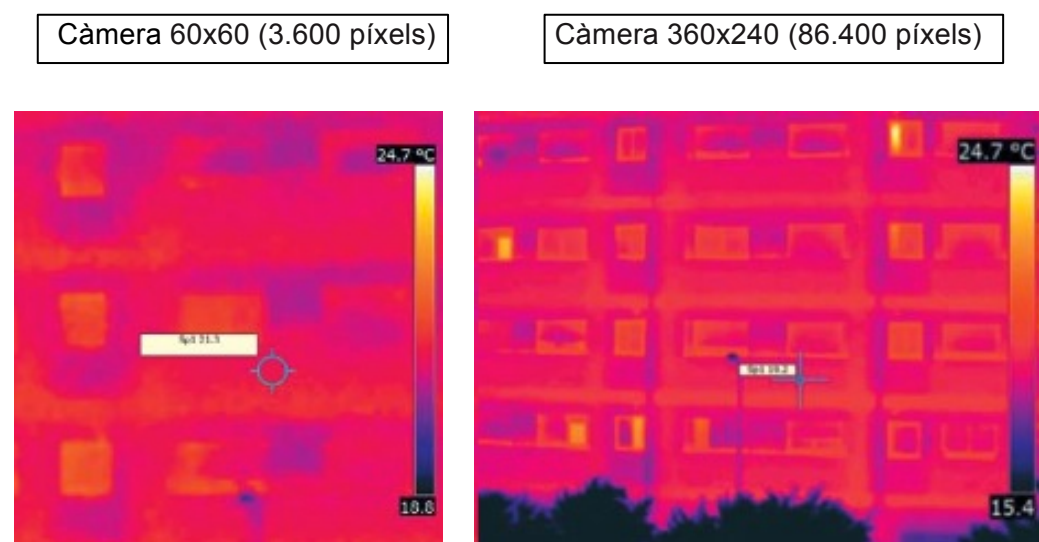


Figura 2.40: Imatges d'una mateixa façana captades amb càmeres termogràfiques diferents (Font: Fernercom)

Marca i distància de la mesura

S'han de tenir present tres variables per determinar la distància de mesura correcta i la grandària màxima del objecte a mesurar:

- L'angle de visió (FOV).
- L'objecte identificable més petit (IFOVgeo)
- L'objecte mesurable/marca de mesura més petit (IFOVmeas).

L'angle de visió (FOV: Field of View) de la càmera termogràfica, descriu l'àrea visible amb la mateixa. Aquest angle horitzontal, ve determinat per l'objectiu utilitzat.

A més, la persona a realitzar l'estudi termogràfic, ha de conèixer l'especificació de l'objecte identificable més petit (IFOVgeo: Instantaneous Field of View) de la seva càmera termogràfica. Aquesta especificació, estableix la grandària d'un píxel segons la distància, és a dir, mesura la resolució geomètrica d'una càmera d'infrarojos.

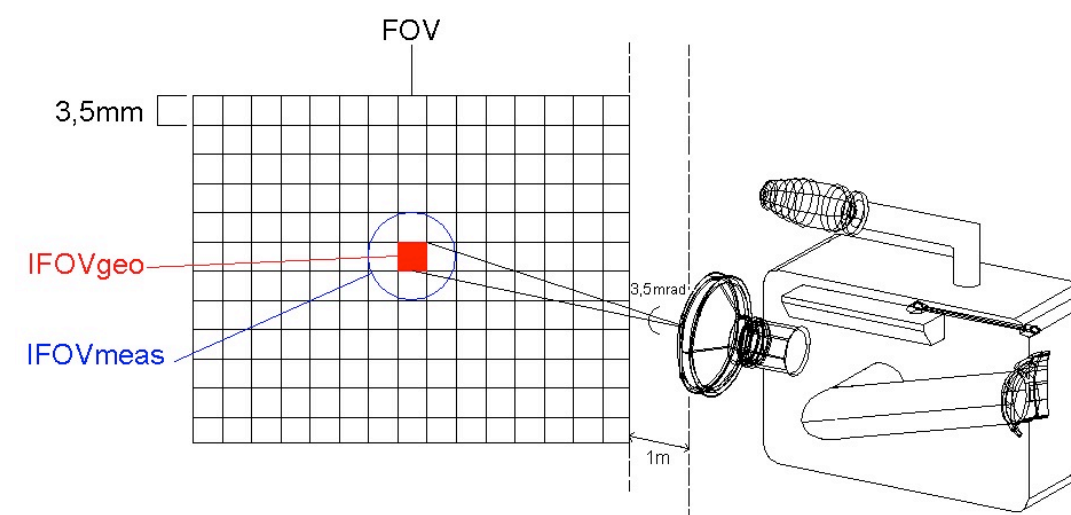


Figura 2.41: Imatge de l'angle de visió d'un píxel (Font: Elaboració pròpia)

No és la grandària del detector, la que determinarà la resolució de la càmera, sinó la distància entre cada punt mesurat de cada detector.

Per exemple si l'IFOVgeo és gran, però el cos que s'està mesurant és molt petit, és possible que no es generi una senyal lo suficientment forta a l'incidir la radiació sobre el detector, i no es visualitzi el cos. Tot i això, aquesta senyal també dependrà de la temperatura que tingui el cos, la qual en cas que sigui elevada és possible que es pugui generar una senyal.

Cal remarcar que s'ha de prendre especial atenció si el punt a mesurar no es posiciona completament en un píxel, ja que es farà mitjana de temperatures. A continuació s'exposa un exemple per facilitar la comprensió:

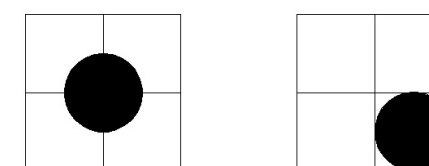


Figura 2.42: Imatge del punt a mesurar posicionat en diferents píxels, on es farà una mitjana de temperatures, i imatge del punt posicionat en un píxel. (Font: Elaboració pròpia)

2.5.4 PARTS I EINES D'UNA CAMERA TERMOGRÀFICA (PRESENTACIÓ DE LA CÀMERA TH9100 MR/WR)

A continuació s'exposen les diferents parts d'una càmera termogràfica, així com les diferents funcions que ens ofereix.

Actualment, en el mercat existeixen diferents tipus de càmeres termogràfiques (equips portàtils o fixos, d'ona curta, mitjana o llarga), que s'escolliran segons necessitats del termògraf en referència a l'escenari a analitzar.

En aquest punt es considera convenient treballar sobre les parts de la càmera termogràfica TH9100 MR/WR, que serà l'equip que s'utilitzarà durant la part pràctica d'aquest projecte.

Aquesta càmera es caracteritza per ser un equip portàtil (fet que ens aportarà comoditat en tot moment durant les inspeccions dels diferents punts dels edificis), radiomètric d'alta sensibilitat i sense contacte. La seva resolució és de 320 x 240 píxels.

Aquesta equip, detecta la radiació emesa des de l'objecte mesurat, que es converteix en una senyal elèctrica, gràcies a la seva matriu de detectors de 2 dimensions. Aquesta senyal elèctrica és amplificada i transformada en digital. La senyal digital, es mostra en pantalla gràcies a una escala de diferents colors o una escala de grisos a través de TFT LDC que està localitzat en la part superior de la càmera.

Les característiques d'aquest model de càmera són:

- Construcció compacta: El detector, la pantalla i la secció de memòria estan juntes en una unitat, d'aquesta manera la mesura de la temperatura i els diagnòstics de la imatge es podran realitzar d'una forma més ràpida.
- Funció auto: Les opcions de la funció auto són AUTO-SENS (estableix la sensibilitat de manera automàtica), AUTO-LEVEL (estableix la temperatura central de forma automàtica) i AUTO-ENFOCAMENT.
- Resistent a la pols i a les esquitxades: Aquesta càmera compleix l'estàndard internacional de protecció (IP54).
- Ús de l'ordinador: A través de la interfície IEEE1394, la targeta de memòria, i els softwares de Windows.
- Equipament per guardar tant senyals de veu com informació visual.

Les diferents parts que componen la càmera termogràfica TH9100 MR/WR són:

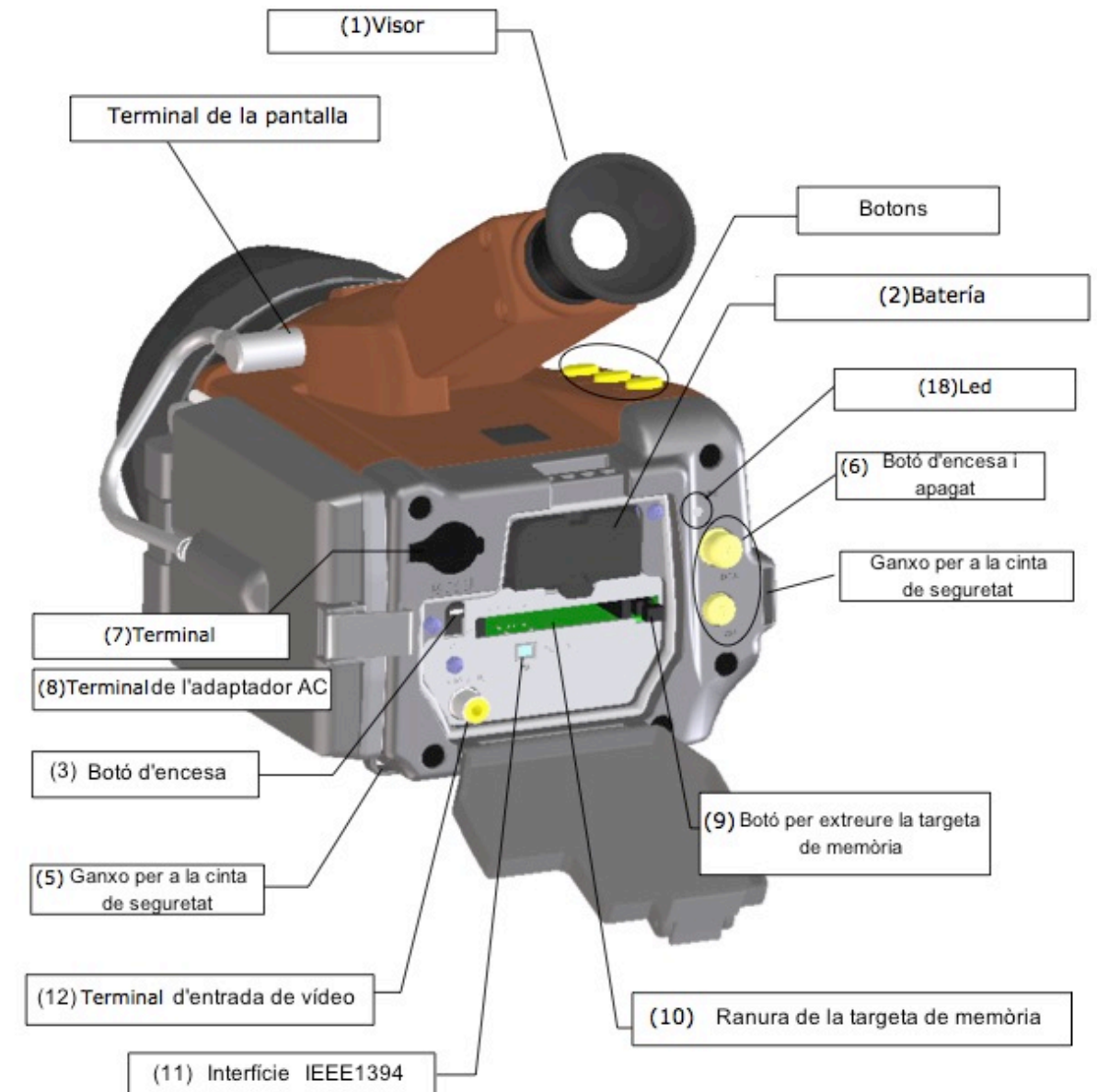


Figura 2.43: Part posterior de la càmera Termogràfica TH9100 MR/WR. (Font: Manual d'Instruccions Càmera TH9100 MR/WR)

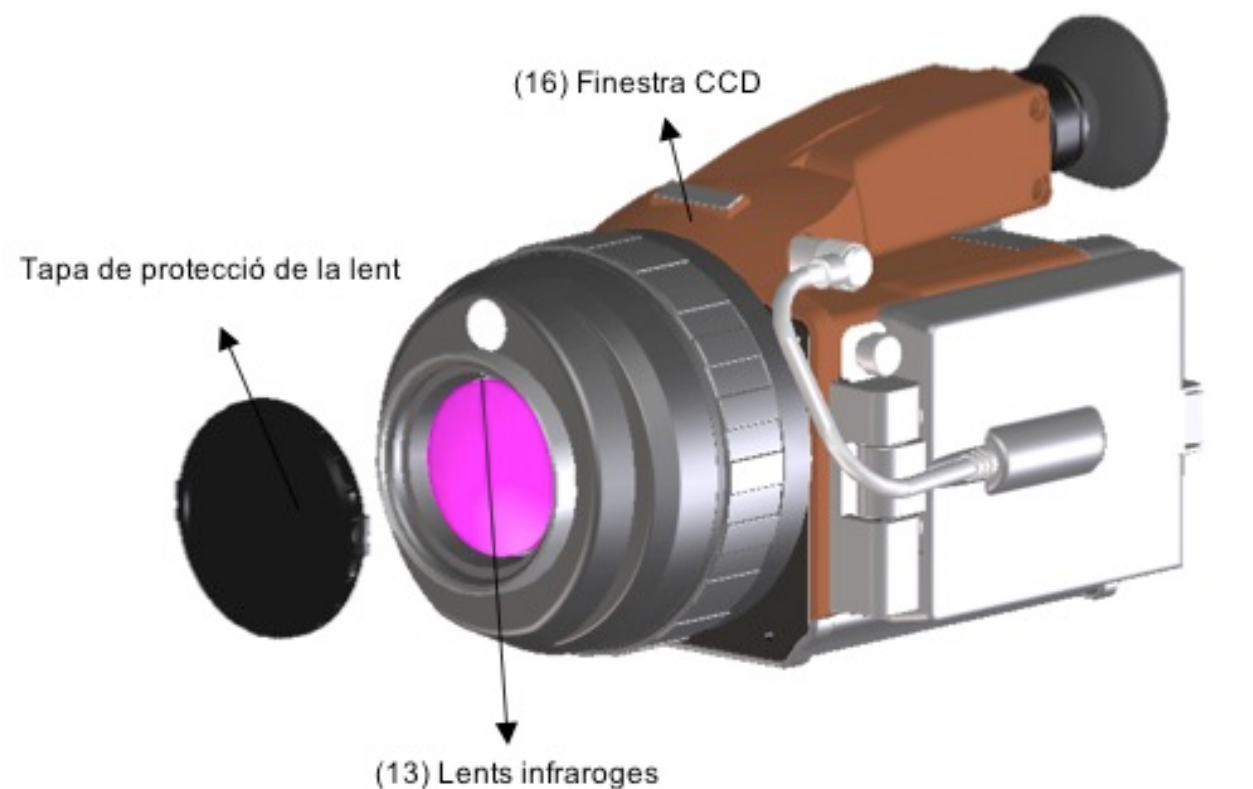


Figura 2.44: Part frontal de la càmera Termogràfica TH9100 MR/WR. (Font: Manual d'Instruccions Càmera TH9100 MR/WR)

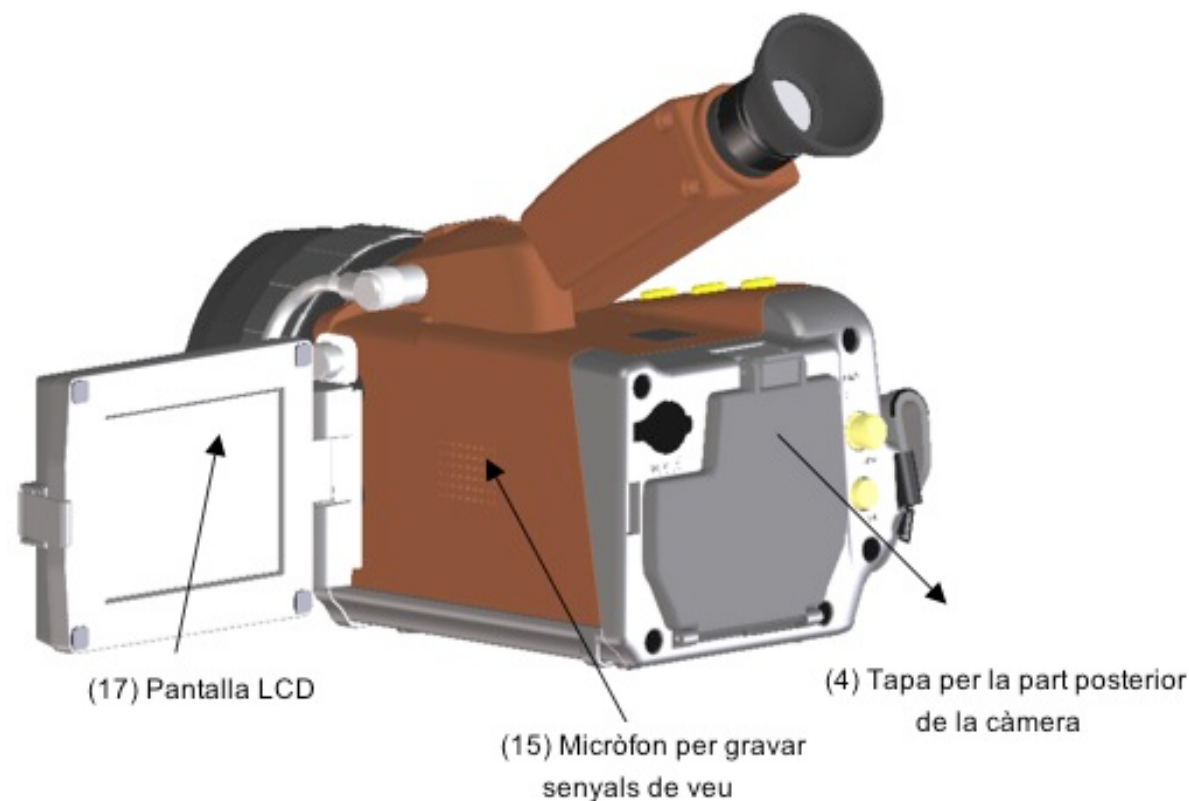


Figura 2.45: Part posterior-esquerra de la càmera Termogràfica TH9100 MR/WR. (Font: Manual d'Instruccions Càmera TH9100 MR/WR)

NÚMERO	DESCRIPCIÓ	FUNCIÓ
[1]	Visor	Mostra a la pantalla la imatge visual a la que s'està enfocant
[2]	Espai per a la bateria	Serveix per introduir el pack de la bateria
[3]	Botó d'encesa	Serveix per posar en marxa la càmera
[4]	Tapa per a la part posterior de la càmera	Aquesta tapa protegeix el botó d'encesa, la targeta de memòria, el terminal d'entrada del vídeo i la interfície IEEE1394.
[5]	Ganxo per a la cinta de seguretat	Serveix per col·locar una cinta que ajudi a la correcta subjecció de la càmera de manera segura.
[6]	Botó d'encesa i apagat de la càmera	És un altre botó que encén i apaga la càmera.
[7]	Terminal	Serveix per connectar el monitor extern per a la senyal de vídeo o el cable RS.
[8]	Terminal de l'adaptador AC	Serveix per connectar l'adaptador AC.
[9]	Botó per extreure la targeta de memòria	Serveix per extreure la targeta de memòria de la càmera termogràfica.
[10]	Ranura per la targeta de memòria	Serveix per inserta la targeta de memòria
[11]	Interfície IEEE1394	Serveix per connectar el cable IEEE1394.
[12]	Terminal d'entrada de vídeo	Serveix per inserta la senyal de vídeo (NTSC o PAL).
[13]	Lents infraroges	Serveix per a que els raigs infrarojos penetrin en la càmera.
[14]	Tapa dels terminals	Emmagatzema els terminals.
[15]	Micròfon	Serveix per gravar i reproduir senyals de veu.
[16]	Finestra CCD	Serveix per a que penetri la llum.
[17]	Pantalla LCD	Mostra la imatge termogràfica i la visual.
[18]	LED	S'il·lumina quan la càmera està encensa i parpelleja quan la càmera està en standby ⁴ .

Taula 2.46: Descripció de les parts de les càmeres i les seves funcions (Font: Manual d'Instruccions Càmera TH9100 MR/WR)

⁴ Mode standby: el carregador adopta aquest mode quan la temperatura de la bateria és inferior a -10°C ±3°C o superior a 60°C + 3°C.

Les diferents eines de la càmera termogràfica són:

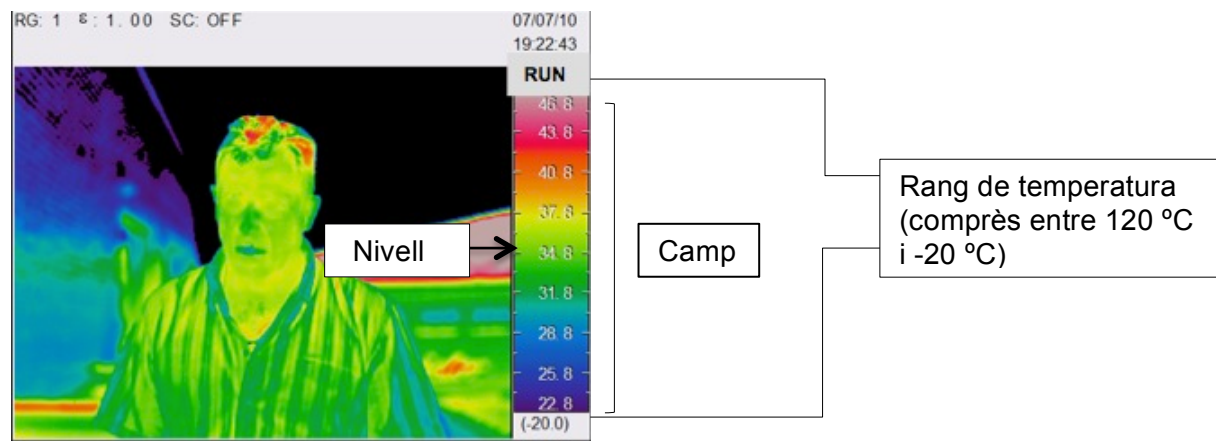


Figura 2.47: Imatge on es mostra el rang, el camp i el nivell en la càmera termogràfica (Font: Fundació de l'Energia de la Comunitat de Madrid i Elaboració pròpia)

- Rang: Fixarà les temperatures màxima i mínima a partir de les quals es pot mesurar amb la càmera. En edificació, s'utilitza de -20 °C a +120 °C, on l'objecte de mesura ha de tenir una temperatura compresa en aquest interval.
- Camp: Serà l'interval de temperatures que s'observen durant la inspecció. La càmera ajusta el camp automàticament.
- Nivell: És el punt mig del camp; si aquest varia també canvia el nivell.

2.5.5 FUNCIONAMENT DE LA CÀMERA TERMOGRÀFICA TH9100 MR/WR

En aquest apartat ens centrem en desenvolupar, el funcionament de les tecles principals que conformen la càmera termogràfica TH9100 MR/WR.

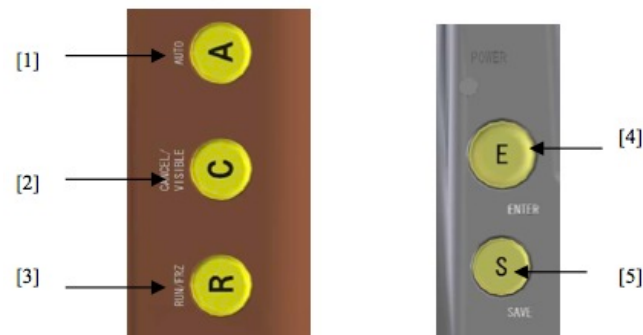


Figura 2.48: Tecles del panell de funcions de la càmera Termogràfica TH9100 MR/WR (Font: Manual d'Instruccions Càmera TH9100 MR/WR)

TECLA	FUNCIÓ
[1] Tecla A	Estableix el mode automàtic.
[2] Tecla C	Es pausa o es cancel·la la funció la qual s'està utilitzant en aquell moment. Accedeix a la imatge visual.
[3] Tecla R	Captura imatges, entra en mode congelar i en l'opció de configuració
[4] Tecla E	Operacions (a dalt, a baix, dreta, esquerra o entrar) <div></div>
[5] Tecla S	Guardar una imatge

Taula 2.49: Descripció de les funcions de les tecles principals de la càmera Termogràfica (Font: Manual d'Instruccions Càmera TH9100 MR/WR)

Per realitzar la presa d'una imatge termogràfica, s'obrirà la tapa posterior de la càmera, i s'introduirà la bateria i la targeta de memòria, on també trobarem el botó d'encesa. Posteriorment escollirem la funció que volem que realitzi la càmera, la qual es pot escollir accedint al menú digital amb la tecla E. Un cop seleccionada la funció dins d'aquest menú, cal enfocar l'objecte.

Per poder obtenir una imatge nítida, existeix la tecla A que realitza l'enfocament de manera automàtica, o es pot realitzar un enfocament manual rotant l'objectiu de la càmera. Un cop tenim la imatge nítida es pot ajustar el rang de temperatura mitjançant la tecla E, i finalment es realitzarà la captura amb la tecla R. Una vegada capturada la imatge, es podrà guardar prenent la tecla S.

És important, que la imatge guardada estigui en format .sit, de tal manera que posteriorment es pugui treballar amb el software corresponent.

*Nota: Les càmeres termogràfiques es caracteritzen per poder fer gravacions de veu, durant la presa de les imatges. Per poder realitzar la gravació, s'haurà de prémer el botó E i per finalitzar aturarem el procés mitjançant el botó C.

2.5.6 SOTWARE DE TRACTAMENT D'IMATGES TÈRMiques

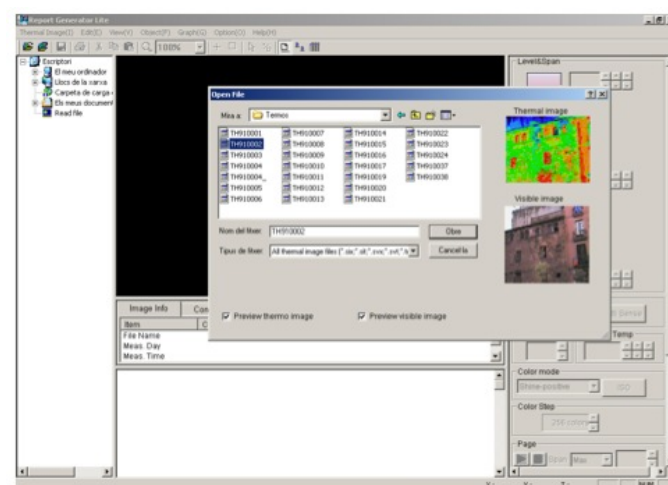
Generalment en el moment que s'adquireix una càmera termogràfica, el fabricant proporciona un software bàsic, que serveix per analitzar les imatges tèrmiques, i d'aquesta manera descobrir més informació de la que pensàvem que ens donava el termograma en el moment de la inspecció.

Sempre que la imatge estigui enfocada, amb el software es pot corregir i optimitzar. A més et permetrà generar un informe tipus, amb les dades de la imatge, logo de la empresa, etc.

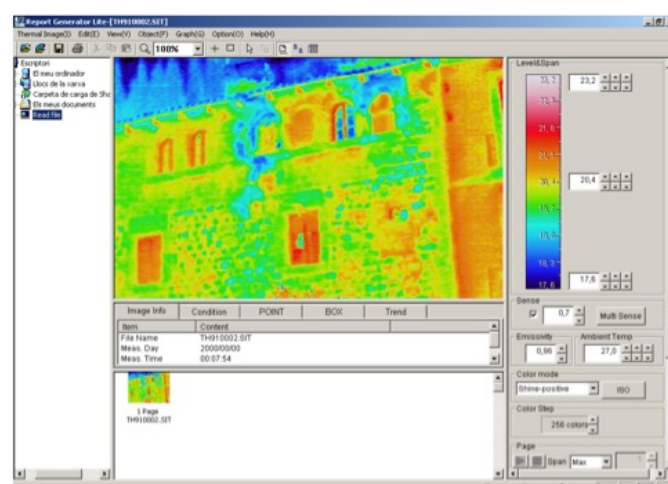
En aquest projecte, es farà ús del software Report Generator Live i Image Processor Pro II, que acompanyen a la càmera termogràfica TH9100 MR/WR, per poder treballar amb els termogrames obtinguts dels edificis analitzats en la part pràctica del treball.

A continuació s'exposen alguns passos bàsics que es poden realitzar amb el software Report Generator Live:

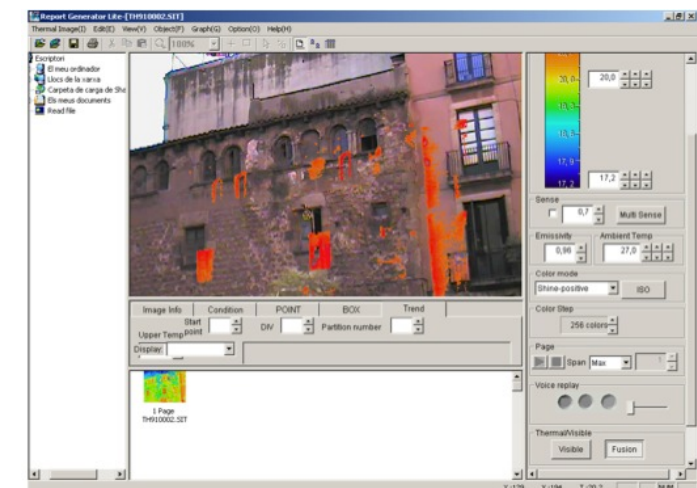
1. Cercar la carpeta amb les imatges tèrmiques i seleccionar la imatge desitjada. Aquesta activitat es realitzarà des de la pestanya Thermal Image (situada a la part superior de la finestra) i situant-nos en la opció Open. Ens trobarem amb la següent imatge:



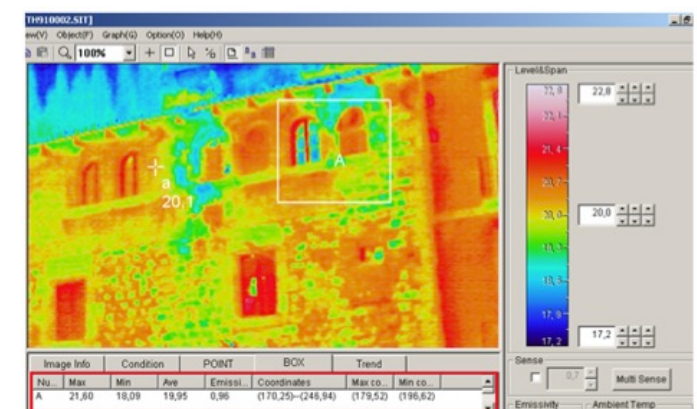
2. Un cop oberta la imatge, es pot observar a la dreta de la finestra la paleta de colors, la qual defineix diferents rangs de temperatura, i els quals es poden modificar, així com la quantitat de colors amb la que volem que es vegi la fotografia. També podem modificar valors d'emissivitat, afegir marcadors, i reproduir sons en cas d'haver fet una gravació durant la presa d'imatges.



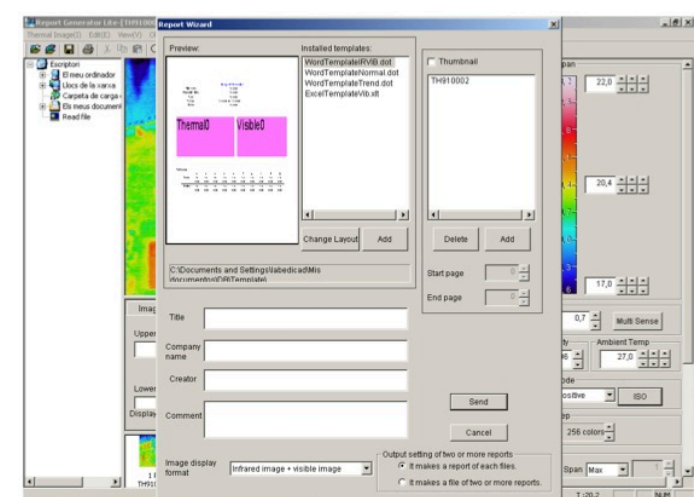
3. El software et proporciona la opció de poder contrastar la imatge digital, amb la imatge infraroja (botó Thermal/Visible). Això permet treballar amb precisió, ja que facilita la localització de les zones amb més contrast de temperatura.



4. Tenir la opció de marcar punts o zones específiques a estudiar, és una eina útil ja que ens facilita el valor de temperatura màxima i mínima, la emissivitat i les coordenades (x,y), d'aquell punt o zona d'objecte d'estudi de la imatge.



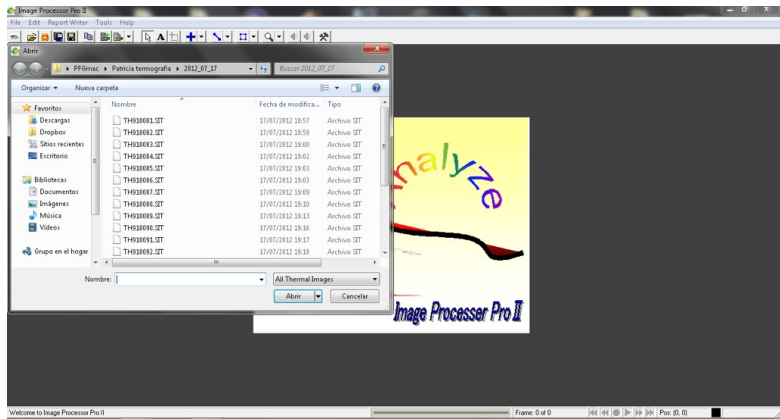
5. A la pestanya EDIT, trobem l'opció de generar un informe, utilitzant diferents plantilles que et proporciona el mateix programa, o creant una plantilla personal. En aquest informe, es pot afegir el nom de la companyia que demana la inspecció termogràfica, el nom de l'autor o creador del informe, un comentari general (dades de la companyia visitada, ubicació de les instal·lacions, etc.



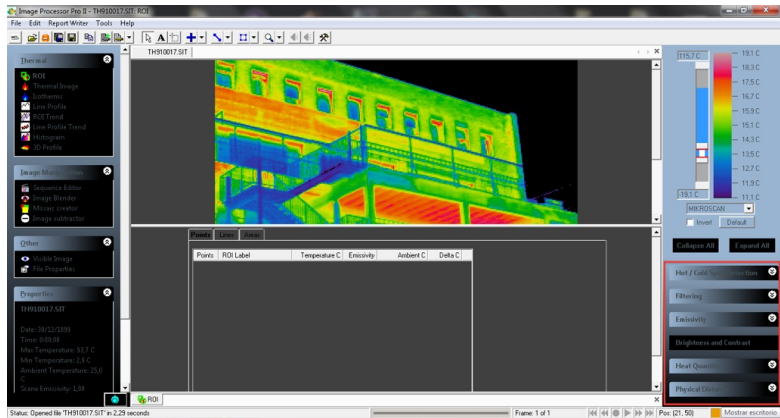
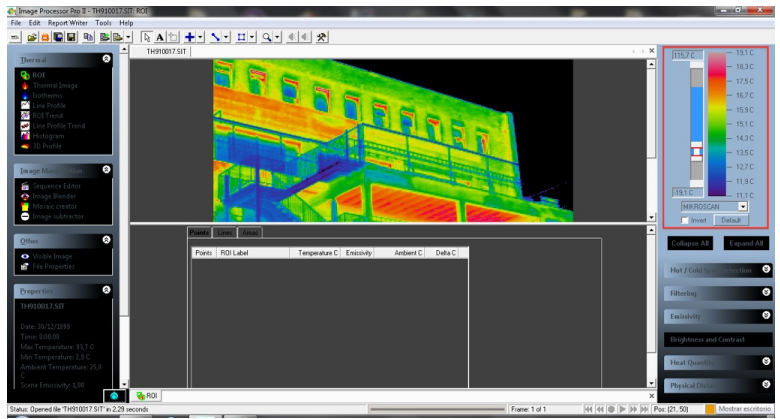
*Nota: Les imatges anteriors tenen la funció de complementar la informació exposada, i s'han elaborat personalment amb el software Report Generator Live.

A continuació s'exposen alguns passos bàsics que es poden realitzar amb el software Image Processor Pro II:

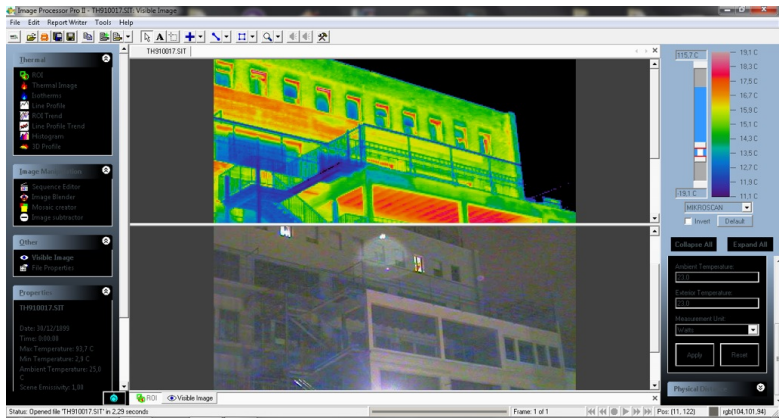
1. Cercar la carpeta amb les imatges tèrmiques i seleccionar la imatge desitjada. Aquesta activitat es realitzarà des de la pestanya File (situada a la part superior de la finestra) i situant-nos en la opció Open. Ens trobarem amb la següent imatge:



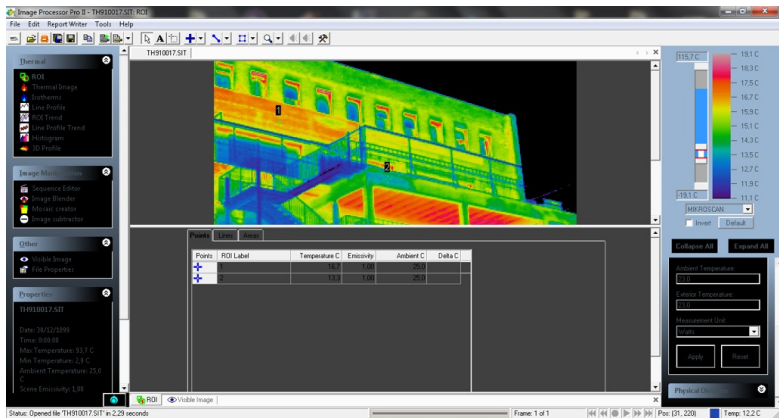
2. Un cop oberta la imatge es pot observar a la dreta de la finestra la paleta de colors, la qual defineix diferents rangs de temperatura, i els quals es poden modificar, així com la quantitat de colors amb la que volem que es vegi la fotografia, característica la qual podem modificar amb la fletxa inferior a la paleta de colors. També podem canviar valors d'emissivitat, de temperatura ambiental, introduir la distància de la presa del termograma, afegir marcadors, i reproduir sons en cas d'haver fet una gravació durant la presa d'imatges.



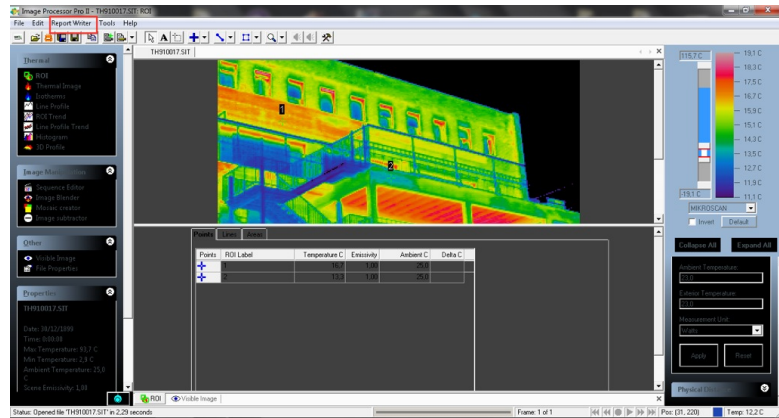
3. El software et proporciona la opció de poder visualitzar en el mateix moment la Imatge digital i la imatge Infraroja. Aquesta funció es pot realitzar dirigint-nos a l'apartat Visible Image ubicat en l'apartat Other de la dreta de la pantalla.



4. El software ens facilita la funció de poder col·locar punts, àrees o línies en la imatge per poder estudiar específicament la temperatura dels punts que ens interessin. Aquestes funcions es troben en la part superior de la finestra, mentre que amb la funció ROI podrem visualitzar els resultats d'aquests punts.



5. Després d'haver estudiat detalladament la imatge, a la pestanya superior Report Writer es pot generar un informe de la imatge analitzada, redactant les conclusions obtingudes durant l'anàlisi dels diferents termogrames.



*Nota: Les imatges anteriors tenen la funció de complementar la informació exposada, i s'han elaborat personalment amb el software Image Processor Pro II.

2.6 COMPARACIÓ ENTRE MÈTODES DE MESURA TRADICIONALS I TERMOGRÀFICS

Aquest apartat es centra en comparar els mètodes de mesura tradicionals, i que actualment es continuen fent servir, amb els mètodes de mesura més innovadors com les càmeres termogràfiques, els quals es troben en els seus inicis dins del sector de l'Edificació. A continuació s'exposen les diferents característiques que componen cadascun dels sistemes de mesura:

TERMOMETRIA	TERMOGRAFIA
Principi de transferència d'energia tèrmica per conducció. És necessari el contacte entre l'objecte i el termòmetre.	Transferència d'energia tèrmica per radiació. No necessita contacte amb l'objecte a mesurar.
Permet mesurar la temperatura un cop establert l'equilibri tèrmic. Temps de resposta lent. No es recomanat per mesurar fenòmens transitoris.	Mètode de mesura amb temps de resposta ràpid, i a temps real. No és necessari temps d'estabilització. Útil per mesurar fenòmens transitoris.
Permet mesurar la temperatura només en un sol punt.	Permet mesurar la temperatura en tota la imatge, i per tant, s'obté més informació.
Dificultat en la mesura d'objectes mòbils.	Es pot mesurar amb facilitat la temperatura en objectes mòbils.
No es possible l'estudi de distribucions tèrmiques, ja que s'han de prendre mesures individuals.	És possible l'estudi de distribucions tèrmiques.
El contacte del termòmetre i l'objecte, i la necessitat d'un equilibri tèrmic, pot alterar la temperatura de l'objecte.	No altera la temperatura de l'objecte a mesurar
La precisió de la mesura no es tan bona com la realitzada amb una càmera termogràfica.	La precisió de la mesura, és generalment millor que la dels sistemes convencionals. Tot i que juga un paper molt important la resolució de la càmera, així com la persona que realitzi la captació de la imatge.

Taula 2.50: Comparació entre les característiques de la Termometria i la Termografia (Font: Elaboració pròpia)

Un cop comparats els mètodes de mesura tradicionals amb els mètodes termogràfics, a continuació s'exposen diferents imatges, on es poden observar de forma gràfica els resultats que obtenim realitzant una mesura amb un termòmetre tradicional o amb una càmera termogràfica:

MESURA AMB UN TERMÒMETRE IR

MESURA AMB UNA CÀMERA TERMOGRÀFICA

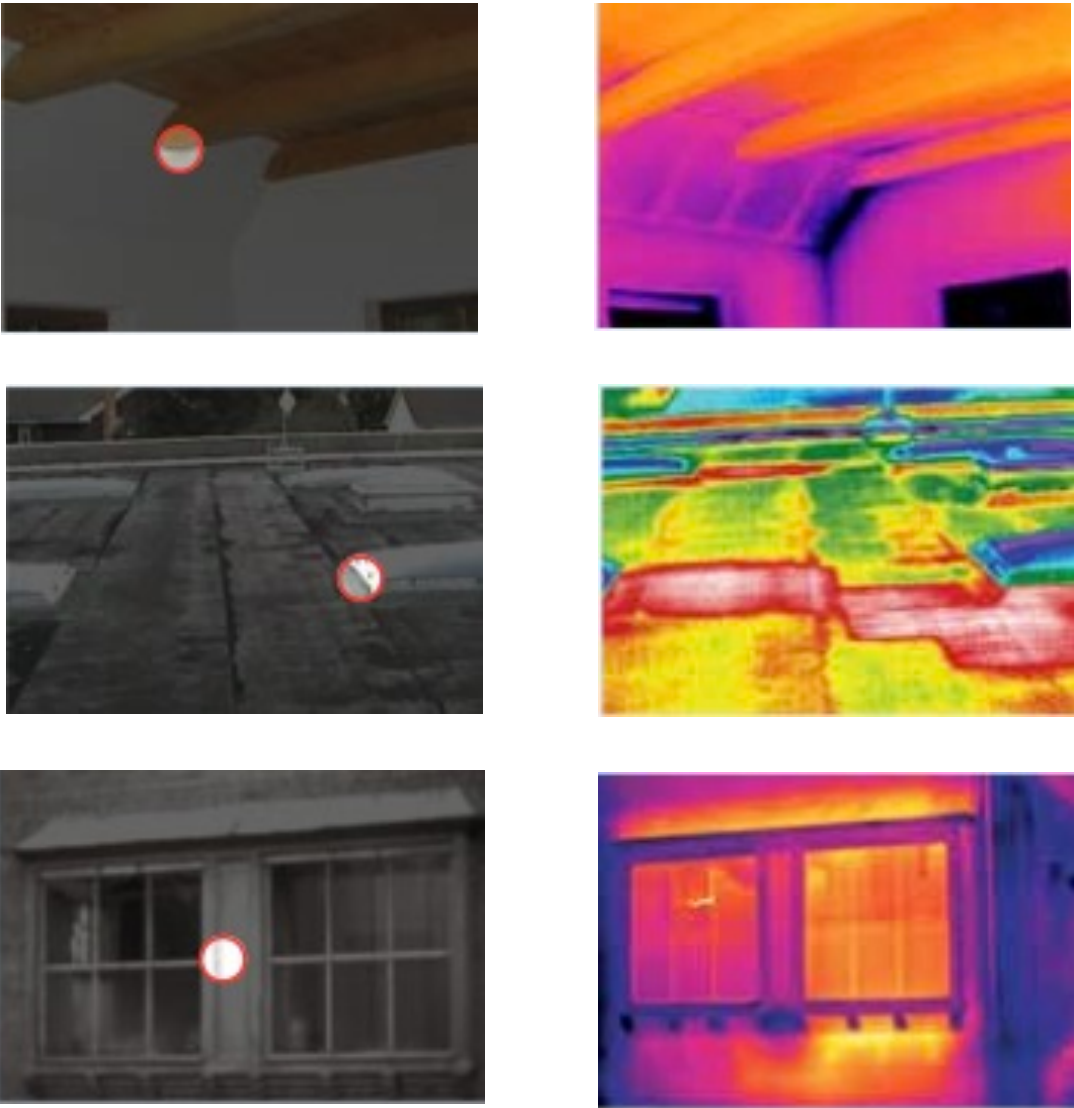


Figura 2.51: Imatges de mesura amb un termòmetre IR i amb una càmera Termogràfics (Font: Flir)

En la figura 2.51 es pot observar que la mesura a partir de càmeres termogràfiques, ens dona més informació de la zona a analitzar, ja que engloba una àrea d'anàlisi més extensa, a diferència dels termòmetres, els quals poden mesurar només un punt específic. Es poden observar resultats més precisos en la mesura amb les càmeres termogràfiques, a més de que ens facilita i agilitza la zona objecte d'anàlisi.

3. ESTUDI PRÀCTIC

Un cop exposada la teoria bàsica necessària per entendre els fonaments de la Termografia, dediquem un apartat a treballar sobre els conceptes pràctics a tenir presents durant la captura de les imatges tèrmiques.

3.1 COM REALITZAR UNA IMATGE TERMOGRÀFICA

La captura d'una imatge, l'emmagatzematge en la targeta de memòria de la càmera i el posterior ús de la mateixa per treballar en l'informe tècnic, és el procés habitual del treball d'un termògraf.

Existeixen quatre passos a seguir per a la correcta captura d'una imatge:

1. **Enquadrament de la imatge:** Si volem mesurar un objecte, el presentarem de la manera més visible i que ens doni més informació.
2. **Enfocament:** Si la imatge està desenfocada, ens donarà mesures errònies.
3. **Ajust del rang de temperatura:** S'ha de fixar el rang de mesura que inclogui el que es vol mesurar. Si es fixa un rang molt gran, tindrem menys precisió en la mesura.
4. **Condicions meteorològiques:** La temperatura exterior és canviant, el que pot provocar que en el moment de realitzar una inspecció termogràfica, aquesta obtingui resultats diferents d'un dia a un altre. Per aquest motiu, és important escollir el moment idoni per realitzar aquest treball.

3.2 L'OBJECTE MESURAT I EL SEU ENTORN (MESURAMENT DE LA TEMPERATURA AMB LA CÀMERA TERMOGRÀFICA)

En aquest apartat ens centrem en estudiar com obtenir dades de temperatura reals en la imatge tèrmica.

Ens trobarem amb la emissivitat com a obstacle principal en el moment d'obtenir la dada de temperatura, ja que en funció d'aquesta característica tindrem més dificultat o facilitat per mesurar-la. A més s'hauran de tenir en compte altres factors que influiran tals com l'ambient, exterior, l'entorn del cos, la distància de mesura, etc. elements que estudiarem a continuació.

Característiques de l'objecte mesurat:

1. **Material i emissivitat**
La superfície de cada material té una emissivitat específica, a partir de la qual es deriva la quantitat de radiació infraroja emesa des del material que es reflexa, i s'emet.
2. **Color**
El color d'un material no té un efecte perceptible en la radiació infraroja d'ona llarga, emesa per l'objecte del que es mesura la temperatura amb una càmera termogràfica.
Les superfícies fosques, absorbeixen més radiació infraroja d'ona curta que les superfícies clares, i per tant s'escalfen més ràpidament. No obstant, la radiació infraroja emesa, depèn de la temperatura i no del color de la superfície del objecte a mesurar.
3. **La superfície de l'objecte a mesurar**
Les propietats de la superfície de l'objecte a mesura tenen un paper molt important en la mesura de temperatura amb una càmera termogràfica, ja que la emissivitat de la mateixa varia segons la seva estructura, el seu recobriment o la seva pulcritud.
4. **Estructura de la superfície**
Generalment, la emissivitat en les superfícies llises, brillants, reflectants i/o polides, és més baixa que en les mat, quartejada, rugosa, erosionada i/o ratllada del mateix material.
5. **Humitat, neu i gel a la superfície**
L'aigua, la neu i el gel tenen unes emissivitats relativament altes (aproximadament $0,85 < \epsilon < 0,96$) per lo que la mesura d'aquestes substàncies, es realitza sense problemes. Tot i això, s'ha de tenir en compte que la temperatura de l'objecte a mesurar pot estar distorsionada si hi ha capes d'aquest tipus. La humitat refreda la superfície de l'objecte degut a l'evaporació, i la neu té unes bones propietats aïllant. Habitualment, el gel no forma una capa aïllant, per lo que s'han de tenir en compte les emissivitats tant del gel com de la superfície que es troba inferiorment quan es realitza el mesurament.
6. **Brutícia i partícules en la superfície**
La brutícia en la superfície de l'objecte a mesurar, com la pols, el lubricant, etc. generalment no incrementa l'emissivitat de la mateixa, per tant, la mesura en objectes tacats no presenta problemes en general. No obstant, s'ha de tenir en compte que la càmera termogràfica mesura

la temperatura de la superfície, és a dir la brutícia, i no la temperatura exacta de la superfície de l'objecte que es troba a la part inferior, i això ens pot conduir a resultats erronis.

7. L'angle de la imatge: Si ens situem perpendiculars a l'objectiu, ens reflectirem sobre ell, i si ens situem al lateral, altres objectes seran els que reflecteixin en la imatge.

La correcta situació per captar la imatge serà la següent:

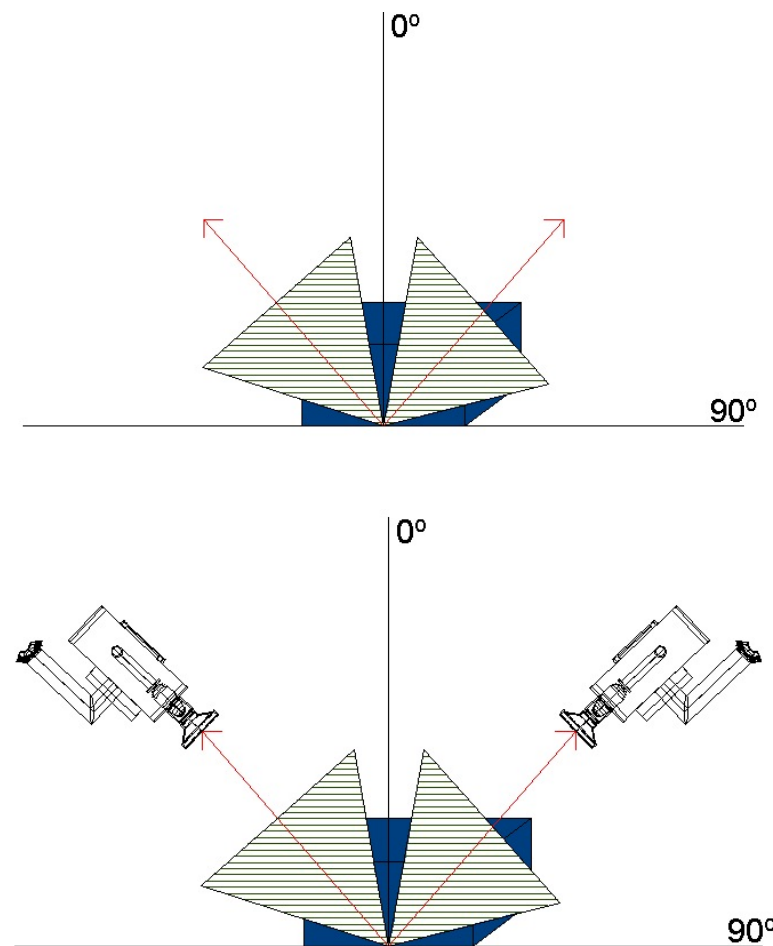


Figura 3.1: Imatge angle de captació imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia)

Característiques de l'entorn de mesurament:

És evident que durant una inspecció, el termògraf es trobarà en un entorn canviant que influirà en la imatge que s'obtingui. Entre el cos a mesurar i la càmera, existeix certa quantitat d'aire. També és habitual que l'objecte a mesurar estigui envoltat d'altres objectes que no ens interessin, però que emeten radiació cap a ell, i aquest la reflectirà cap a la càmera.

Tota mesura d'un objecte, ha de començar per una mesura o estimació de la Temperatura ambient.

1. Temperatura ambient

En moltes aplicacions, la temperatura reflectida correspon a la temperatura ambient, la qual es pot mesurar amb un termòmetre específic. Sempre que hi hagi una gran diferència de temperatura entre la temperatura de l'objecte a mesurar, i la temperatura ambient, és important ajustar la emissivitat de forma correcta.

2. Radiació

Tot objecte amb temperatura superior al zero absolut (0 Kelvin = -273,15 °C) emet radiació infraroja. Per aquest motiu, els objectes amb gran diferència de temperatura amb l'objecte a mesurar, poden alterar el mesurament per infraroigs, com a resultat de la seva pròpia radiació. En aquests casos, s'ha d'evitar aquestes fonts d'interferència, col·locant pantalles (cartrons, teles, etc.), per minimitzar aquests efectes negatius. En cas de que no es puguin evitar, s'ha de tenir en compte que la temperatura reflectida no es correspon amb la temperatura ambient.

Característiques especials de la termografia en exteriors:

Si el cel està ras, aquesta radiació (≈ -50 °C a -60 °C) i la llum del sol (≈ 5500 °C) es reflecteixen durant el dia. L'àrea del cel supera l'àrea del Sol, amb lo qual la temperatura reflectida en la termografia en exteriors sempre es situa per sota de 0°C, inclús en un dia assolellat. Els objectes emmagatzemen calor com a resultat de l'absorció dels raigs del Sol, això cal tenir-ho present, ja que afecta a la temperatura de les superfícies.

3. Meteorologia

Núvols

Les condicions ideals pel mesurament en exteriors, són un dia ennuvolat, ja que la capa de núvols evita que els objectes es vegin afectats pels raigs solars i la radiació celestial difusa.

Precipitació

Una fort precipitació (pluja, neu) pot distorsionar el resultat del mesurament. L'aigua, el gel i la neu tenen una elevada emissivitat i per tant, són impermeables a la radiació infraroja. A més, el mesurament en objectes mullats és errònia, ja que la temperatura de la superfície de l'objecte es refreda a mesura que s'evapora l'aigua.

El Sol

S'ha d'evitar la llum directa del Sol, inclús unes hores abans de la inspecció. És recomanable mesurar a primera hora del matí, o última hora del dia.

4. L'ambient

Humitat ambient

La humitat ambient relativa ha de ser suficientment baixa per a que no hi hagi condensació en l'aire, o baf en l'objecte a mesurar, en el filtre de protecció o inclús en l'objectiu de la càmera. Si aquests, es troben entelats, part de la radiació infraroja que arriba a la càmera es perd perquè no pot penetrar a través de l'aigua present en la lent.

Una boira carregada també afecta al mesurament perquè la rosada present en el canal de transmissió bloqueja part de la radiació infraroja.

Corrents d'aire

Qualsevol flux o corrent d'aire en una sala, afecta al mesurament de temperatura amb la càmera termogràfica.

Com a resultat de l'intercanvi de calor (convecció), l'aire proper a la superfície té la mateixa temperatura que l'objecte mesurat. Si hi han corrents d'aire, aquesta capa desapareix, substituïda per una altra capa, temperatura de la qual encara no s'ha adaptat a la del objecte. Per mitjà de la convecció, l'objecte mesurat desprèn o absorbeix calor fins que la temperatura de la seva superfície i la de l'aire han arribat a un equilibri. L'efecte de l'intercanvi de calor s'incrementa contra més gran és la diferència de temperatura entre la superfície de l'objecte a mesurar i la temperatura ambient.

Contaminació

Algunes matèries suspeses en l'aire, com la pols, el fum, etc. tenen una elevada emissivitat i quasi bé no permeten la transmissió. Aquestes matèries poden modificar la mesura, ja que emeten la seva pròpia radiació infraroja. A més aquestes matèries absorbeixen i dispersen, part de la radiació infraroja que emet l'objecte, això comporta que no es detecti totalment aquesta radiació en la càmera termogràfica.

5. La llum

La llum o la il·luminació no afecten significativament al mesurament amb una càmera termogràfica. Es pot mesurar en la foscor, ja que la càmera mesura la radiació infraroja d'ona llarga.

Tot i això, algunes fonts de llum calenta emeten radiació infraroja que poden afectar a la temperatura dels objectes propers, com per exemple la llum directa del Sol o la proximitat a una bombeta calenta.

3.3 DETERMINACIÓ PRÀCTICA DE L'EMISSIVITAT I LA TEMPERATURA DE LA RADIACIÓ REFLECTIDA

En el camp de l'Edificació, no és vinculant la determinació específica de la emissivitat, ja que ens interessa saber diferències de temperatura per poder intuir i corroborar fets, i en molts casos no hi ha accessibilitat. Habitualment es col·loquen valors estàndards, com per exemple: emissivitat = 0,95 i $T = T^{\circ}$ ambient (Valors que posteriorment es modificaran amb el software).

Tot i això, si es vol treballar detalladament, per determinar la emissivitat de la superfície d'un objecte, es poden utilitzar tres procediments, els quals s'exposaran a continuació:

Determinació de l'emissivitat:

- Consultant una taula d'emissivitats (es tracten de valors aproximats, que en alguns casos no corresponen a l'emissivitat de la superfície de l'objecte que s'està mesurant). No és recomanable l'ús d'aquest mètode. A l'annex 4 s'exposa una taula d'emissivitats dels materials.
- Mitjançant una mesura de referència amb un termòmetre de contacte.
En primer lloc s'ha de mesurar la temperatura de la superfície de l'objecte mesurat amb un termòmetre de contacte. Posteriorment, es mesura la temperatura de la superfície amb la càmera termogràfica i amb emissivitat 1. La diferència entre els dos valors, és el resultat de la emissivitat configurada molt elevada. S'haurà de reduir gradualment l'ajust d'emissivitat, fins que els dos valors coincideixin. Quan això es compleixi, l'ajust d'emissivitat correspondrà a l'emissivitat de la superfície de l'objecte mesurat.
- Mitjançant una càmera termogràfica.
En primer lloc, s'enganxa un tros de cinta aïllant adhesiva d'emissivitat coneguda sobre l'objecte a mesurar. Després d'una estona, es mesura la temperatura de l'àrea amb la cinta, amb la càmera termogràfica i l'emissivitat ajustada a la de la cinta. La temperatura mesurada és el valor de referència. A continuació cal mesurar sobre l'objectiu (sense la cinta), obtenint una altra mesura de temperatura. A continuació cal anar modificant l'emissivitat fins que la càmera mesuri la mateixa temperatura en qualsevol zona, que el valor de referència. El valor d'emissivitat ajustat, correspon a l'emissivitat de la superfície de l'objecte mesurat.



Figura 3.2: Cinta adhesiva d'emissivitat coneguda $\epsilon = 0,95$. (Font: Testo)

Determinació de la temperatura de la radiació reflectida:

La temperatura de la radiació reflectida és la temperatura aparent dels cossos que es reflecteixen en l'objecte que s'està mesurant, degut a que es troben a prop del mateix.

En la figura 3.3 s'observa l'objecte 2 proper a l'objecte 1, el qual es vol mesurar. L'objecte 2 representa la temperatura reflectida i és important determinar-la, per obtenir una correcta mesura.

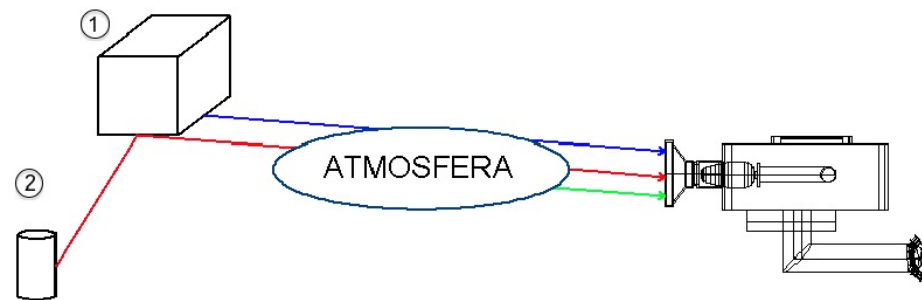


Figura 3.3: Esquema determinació de la temperatura de la radiació reflectida (Font: Elaboració pròpia)

Si durant la inspecció termogràfica, no existeix qualsevol font d'interferència que pugui afectar al mesurament, la temperatura de la radiació reflectida serà igual que la temperatura ambient. Per tant, es podrà mesurar aquesta temperatura amb un termòmetre ambient, i ajustar la Temperatura de la radiació reflectida basant-se en aquest valor.

Tot i això, si existeixen fonts de radiació properes al lloc del mesurament, s'ha de determinar detalladament la Temperatura de la radiació reflectida per assegurar un resultat precís en la inspecció termogràfica.

Els mètodes pràctics per determinar la Temperatura de la radiació reflectida són:

- Mesura de la temperatura reflectida amb un radiador Lambert:

Un radiador Lambert, és un objecte que reflecteix la radiació incident amb la difusió òptima, és a dir, amb la mateixa intensitat en qualsevol direcció.

- La segona opció, és col·locar sobre l'objectiu, una làmina de paper d'alumini arrugada i allisada de nou, ja que la làmina té una elevada reflexió. La radiació que rep aquest tros de paper és difusa, vindrà de totes parts i la irradiarà en totes direccions. Com es vol determinar la temperatura aparent de la font de reflexió, es fixarà la emissivitat a 1 i la distància a 0.

Si la distància és 0, la temperatura de l'aire i la humitat relativa deixen de tenir importància. El mateix passa amb la Temperatura de la radiació reflectida, ja que com s'ha fixat $\epsilon = 1$, p serà igual a 0.

La temperatura que es mesuri sobre aquest paper serà la dada de Temperatura de la radiació reflectida.

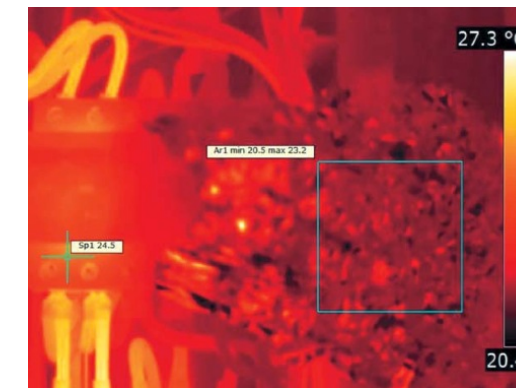


Figura 3.4: Imatge infraroja d'un paper d'alumini arrugat (Font: Fenercom)

3.4 ANÀLISI DE LES IMATGES TÈRMiques

A partir de la imatge tèrmica s'emetrà un possible diagnòstic. Cal remarcar que aquesta imatge no mostra dades reals de temperatura, sinó que mostra la temperatura aparent.

La Temperatura aparent és la temperatura llegida, no compensada o corregida en la càmera termogràfica. Ens mostrarà tota la radiació incident en la càmera, independentment de la font de la qual procedeixi la radiació infraroja.

Existeixen dos mètodes d'anàlisi de les imatges tèrmiques: l'anàlisi qualitatiu i l'anàlisi quantitatiu.

- Anàlisi quantitatiu (Mesures quantitatives): S'utilitza quan el procés implica un canvi en les variables de temperatura i emissivitat. Aquestes mesures es divideixen en dues subcategories:

- Mesures directes: La temperatura en cada zona es mesura amb termoaparaells o termòmetres de contacte. Mitjançant la termografia es determinen els punts a mesurar i, una vegada mesurada la temperatura superficial, s'estudien les diferències d'emissivitat.
- Mesures relatives: S'utilitza una emissivitat de referència coneguda de l'objecte, i a partir d'aquesta referència, es calcula la temperatura de la superfície. Una vegada tinguem la temperatura, es mesura l'emissivitat sobre l'objecte.

- Anàlisi qualitatiu (Mesures qualitatives): S'utilitzen quan canvia una variable del procés, i sabem que tots els factors erronis no alteren la superfície a mesurar. Per exemple, si l'emissivitat és constant ja que es tracta del mateix material o molt semblant entre materials, ens permet interpretar canvis de temperatura fàcilment.

Compensació de la imatge tèrmica

La compensació de la imatge es pot realitzar, durant la inspecció (in situ, sobre la càmera), o posteriorment amb el software de tractament d'imatges tèrmiques. Totes les càmeres infraroges permeten modificar la temperatura de la radiació reflectida, l'emissivitat, la distància, la temperatura exterior i la humitat relativa. Això permet passar de temperatura aparent a temperatura real.

3.5 ERRORS DURANT UNA INSPECCIÓ TERMOGRÀFICA

A continuació s'exposen diferents factors que poden alterar el resultat de la mesura per infrarojos:

- Ajust incorrecte de l'emissivitat i de la RTC (Temperatura de la radiació reflectida).
- Desenfocament de la imatge que comporta una imatge tèrmica borrosa.
- Distància de mesura molt llarga o molt curta.
- Mesures a un objecte incompatible.
- Brutícia o impediments d'objectes en el canal de transmissió de la càmera.
- Efectes de fonts externes de radiació, com per exemple el sol, llums incandescents, etc.
- Incorrecta interpretació d'una imatge tèrmica degut a la reflexió.
- Canvis ràpids de temperatura ambient.
- Incorrecta interpretació de la imatge tèrmica per carència de coneixement sobre l'objecte a mesurar (s'ha de saber quina forma té l'objecte i les seves característiques).
- Falta de coneixements teòrics sobre Termografia: important conèixer conceptes de transferència de calor, materials i les seves propietats, atmosfera i la seva influència, etc.
- Error en l'elecció de la càmera òptima segons la situació. No totes les càmeres son vàlides per a totes les activitats. El detector infraroig de la càmera és sensible a una determinada franja de l'espectre electromagnètic. Existeixen les càmeres d'ona curta i d'ona llarga, i serà imprescindible escollir segons les necessitats de l'estudi.
- Selecció incorrecta del rang de temperatura que evitarà extreure tota la informació possible de la imatge
- Error en l'angle amb el que es pren la imatge.

3.6 RESUM PART PRÀCTICA DEL PROJECTE: ANÀLISI TERMOGRÀFIC DELS DIFERENTS EDIFICIS

A l'annex 1 podem trobar la part pràctica d'aquest Projecte Final de Grau, la qual tal i com s'ha esmentat en la introducció d'aquest Projecte, consisteix en l'anàlisi termogràfic de quatre edificis escolars i dels immobles que composen una mançana de l'Eixample. L'estudi teòric per a una correcta comprensió de la Termografia és essencial per poder dur a terme un encertat informe termogràfic. Per aquest motiu era necessari enfocar la primera part de la recerca en treballar amb tots els coneixements que engloben aquesta tècnica per poder duu a terme un correcte posterior treball pràctic.

Per a la realització dels diferents anàlisis termogràfics, s'ha fet un estudi previ dels diferents edificis que eren objecte d'estudi energètic de diferents estudiants per a la realització dels seus Projectes Finals de Grau. Aquest estudi ha ajudat a seleccionar els immobles que pel seu ús i característiques ens podien aportar un ampli ventall dades de dades diferents, i per tant treballar amb una gran quantitat d'informació.

Les diferents tipologies d'edificis, dels quals s'ha realitzat un anàlisi Termogràfic per estudiar el comportament de la seva pell són:

Primer edifici analitzat:

Col·legi l'Estonnac Barcelona

Segon Edifici analitzat:

CEIP Doctor Ferran i Clúa, Barcelona

Tercer edifici analitzat:

Fundació escolar Isabel de Villena, Esplugues de Llobregat

Quart edifici analitzat:

Institut Narcís Monturiol, Barcelona

Anàlisi de la Mançana de l'Eixample:

Mançana de l'Eixample limitada pels Carrers de València, Pau Claris, Mallorca i Passeig de Gràcia.

4. CONCLUSIONS / RECOMANANCIONS

En aquests darrers anys, la importància en l'eficiència energètica dels edificis està guanyant un paper molt important dins de la societat. L'ésser humà està prenent consciència de la situació de les energies no renovables, i d'aquelles que causen un impacte ambiental significant. A més, l'interès per l'estalvi de les mateixes i en conseqüència per les reduccions dels consums per aconseguir l'indemne econòmic, està comportant que l'usuari comenci a decantar-se per opcions com la demanda d'una avaluació energètica i/o la Rehabilitació energètica del seu edifici.

Amb aquest projecte s'ha volgut treballar dins d'aquesta línia de sostenibilitat amb edificacions existents, cercant deficiències en la pell dels edificis a partir de la Termografia com a tècnica d'anàlisi, amb l'objectiu d'identificar les mancances d'aquests edificis específics enfront un comportament energètic, donant a conèixer aquesta tècnica innovadora.

La investigació sobre la tècnica de la Termografia ha jugat el paper fonamental dins d'aquest projecte, per aquest motiu una vegada arribats a aquest punt del treball i després d'haver realitzat una investigació minuciosa i una posterior posada en pràctica, cal determinar que el potencial de la Termografia és molt complet, ja que permet obtenir gran quantitat d'informació ràpidament i sense realitzar assajos destructius, fet que ha facilitat l'anàlisi dels edificis per poder millorar la seva eficiència energètica.

Donat que l'objectiu d'aquest treball era la investigació de la tècnica de la Termografia, i posteriorment l'aplicació dels coneixements termogràfics a edificis existents, per avaluar el seu comportament eficient, cal concloure que s'han treballat en els següents temes:

- Investigació sobre la tècnica de la Termografia a partir de recerca documental, i amb contactes amb gent especialitzada en la matèria.
- Investigació sobre el funcionament de la càmera termogràfica i del software corresponent.
- Recerca de dades dels edificis objectes d'anàlisi.
- Realització in-situ dels termogrames amb la càmera termogràfica dels edificis objecte d'anàlisi.
- Anàlisi de les diferents termografies amb el software i la posterior justificació de les mateixes, a partir de la base documental.
- Treball comú amb estudiants els quals estaven realitzant avaluacions energètiques d'aquests edificis com a Projectes Final de Grau.

En referència amb l'estudi eficient dels diferents edificis, cal concloure que generalment les façanes dels immobles analitzats pateixen una ignorància constructiva respecte als paràmetres actuals que

tenim presents amb criteris mediambientals. Podem afirmar que l'estalvi energètic a partir de la limitació de la demanda en la pell dels edificis no s'ha considerat intrínsec en la rehabilitació d'algunes façanes, i que aquest tipus d'intervencions han estat certament minoritàries.

Cal destacar que aquest Projecte Final de Grau portava com a missatge, fer entendre l'essència de la tècnica de la Termografia i realitzar una petita aportació, per donar a conèixer aquets mètode d'anàlisi que està desenvolupant-se dins del sector de l'Edificació. Es tracta d'un tema desconegut per molts estudiants de l'Escola, per aquest motiu s'ha treballat conjuntament amb companys els quals estaven realitzant auditories energètiques per complementar la informació dels seus edificis amb aquest art, i d'aquesta manera poder mostrar en primera persona tot el que comporta l'ús de la Termografia per verificar el comportament eficient dels edificis.

Aportació d'aquest Treball d'investigació a altres projectes:

S'entén que la millor manera per donar a conèixer aquesta tècnica de mesura és treballar conjuntament amb les persones, per demostrar el seu funcionament i els resultats que es poden obtenir. Per aquest motiu, es va considerar que la millor solució era treballar amb els estudiants que estaven realitzant paral·lelament avaluacions energètiques d'edificis, per demostrar com amb la Termografia es podia contribuir i facilitar l'obtenció de dades dels edificis que s'estaven estudiant.

Aquest Projecte ha servit per aportar a altres treballs, dades necessàries per justificar situacions de l'immoble, per poder observar els diferents ponts tèrmics de les façanes, per poder corroborar càlculs i hipòtesis que s'havien realitzat i per trobar punts on existeixen pèrdues energètiques, i que no s'havien detectat, d'una manera ràpida i precisa. Aquest treball comú també ha aportat coneixement als mateixos estudiants sobre un nou mètode d'anàlisi, del qual desconeixien el seu funcionament. En referència al projecte de "La unitat de mançana de l'Eixample" (treball el qual estava finalitzat), s'ha realitzat una continuació del mateix (ja que es tractava d'un conjunt edificatori interessant tant pel seu ús com per les seves solucions constructives), aportant imatges termogràfiques per corroborar totes aquelles deficiències que les autores de la realització del mateix van estudiar en el seu moment, i d'altres que s'han pogut detectar amb la càmera termogràfica.

La realització d'aquest projecte ha estat molt agradable, ja que concloc aquesta recerca carregada de nous coneixements que m'agradaria poder compartir amb totes aquelles persones interessades en el tema. Seria molt gratificant, que un cop consultat aquest treball, el lector prengui interès sobre la matèria, i continuï investigant sobre aquest mètode d'anàlisi. Segons el meu parer, aquest Projecte Final de Grau pot servir com a base documental per continuar investigant sobre la Termografia i les seves aplicacions dins del sector de la construcció. A més, crec que les rehabilitacions energètiques cada vegada estan agafant més protagonisme, i les intervencions en la pell de l'edifici són la solució més eficient per obtenir nous valors de l'immoble, resultats que podem obtenir amb la Termografia.

5. BIBLIOGRAFIA

Normativa:

ASTM C 1060-90 (2003) Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings, (2003).

ASTM C 1153-97 (2003) Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems using Infrared Imaging, (2003).

ASTM C 1046-95 (2007) Standard Practice for in-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components, (2007).

CTE-DB-HE1. Document bàsic de la Limitació de la Demanda Energètica.

CTE-DB-S. Document bàsic de Salubritat.

ISO EN 13187:1999 Thermal Performance of Buildings. Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes. Infrared Method, (1999).

Ordenança de Rehabilitació i Millora de l'Eixample. 22/11/2002

Reial Decret 21/2006, de 14 de febrer, pel qual es regula d'adopció de criteris ambientals i d'ecoeficiència en els edificis.

Llibres consultats:

Jiménez Herrero, Juan A. (1994), Termografía infrarroja, conceptos básicos y aplicaciones. *Mundo Electrónico*, Vol. 252, p. 46-49

Levesque, P., Lisiecki, B., Kubin, L., Caron, P., Deom, A. and Balageas, D. (1993) Infrared Thermography of plastic instabilities in a single Crystal superalloy Chatillon. ONERA, Chatillon-France.

Rosa Maria Esbert, Jorge Ordaz, Fco. Javier Alonso y Modesto Montoto (1997). Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos cerámicos. Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes tècnics de Barcelona.

Sanglier, G. (2003), "Aplicación de la termografía al estudio de pérdidas energéticas en edificios". A: *Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso de Teledetección*. p. 329-332 Cáceres, España.

Ponències:

Assistència al 8º Seminari Termografía en Edificació Testo (29 de Maig de 2012). Ponent: Oscar Tortajada (Responsable de productes de Termografía Testo). Barcelona - World Trade Center (edifici Est, sales A annexes a l'auditori). Moll de Barcelona, s/n, 08039 Barcelona

Projectes Finals de Grau consultats:

- David Molina. (en procés de realització) Estudi previ, projecte de millora sostenible i pla de manteniment de l'edifici on es troba ubicat l'Institut Narcís Monturiol, a la ciutat de Barcelona. Projecte Final de Grau EPSEB-UPC (pendent d'entrega).

- Luis Enrique Guilleumas. (2012) Estudio ambiental de edificios docentes: CEIP Doctor Ferran i Clúa, Barcelona, Calle Garcilaso 204 de Barcelona (08027). Projecte Final de Grau EPSEB-UPC (2012).
- Omar Marcos i David Gilberte. (2012), Estudios previos d'un centre docent de 1960, rehabilitació energètica, acondicionament acústic- tèrmic i pla de manteniment. Fundació escolar Isabel de Villena, Esplugues de Llobregat. Projecte Final de Grau EPSEB-UPC (2012).
- Patricia López i Aida Plomer. (2011), Propostes de Rehabilitació Energètica: La unitat de mançana de l'Eixample. Projecte Final de Grau EPSEB-UPC (2011).
- Sergi Lloberas. (2012), Estudio Ambiental de edificios docentes: Col·legi l'Estonnac Barcelona, Carrer de Pau Claris nº 131, esquina C/ Aragó nº 284 de Barcelona (08009). Projecte Final de Grau EPSEB-UPC (2012).

Pàgines web consultades:

www.testo.es/termografia (data última consulta: 21/12/2012).
www.camaras-termograficas.es (data última consulta: 21/12/2012).
http://www.meteoclimatic.com/mapinfo/ESCAT?d=20120310&screen_width=1440 (data última consulta: 21/12/2012).
<http://www.nivelatermografia.net/termografia> (data última consulta: 21/12/2012).
http://www.termografics.com/ejemplos_aplicacion_termografia.asp?tipo=4 (data última consulta: 21/12/2012).
<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-fenercom-2011.pdf> (data última consulta: 21/12/2012).
<http://www.termografia.com/paginas/aplicaciones/seguridad.htm> (data última consulta: 21/12/2012).
http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T820325/T820325_ES.pdf (data última consulta: 21/12/2012).
<http://bunkerdiseno.com/capitel/wp-content/uploads/2009/11/inspeccion-termografica-fachadas.pdf> (data última consulta: 21/12/2012).
<http://termagraf.wordpress.com/2012/01/04/termografia-en-envolventes-de-edificios/> (data última consulta: 21/12/2012).
http://www.termografia.es/pdf/guia_termografia_aplicaciones_edificios_energia_renovable.pdf (data última consulta: 21/12/2012).
http://w10.bcn.es/APPS/cat_patri/editElement.do?reqCode=inspect&id.identificador=3211&id.districte=02& (Ajuntament de Barcelona. Cercador de patrimoni Arquitectònic). (data última consulta: 21/12/2012).
<http://www.sedecatastro.gob.es/> (data última consulta: 21/12/2012).

*Nota: les consultes de les pàgines web s'han realitzat des del mes de Març fins al mes de Desembre, tot i això s'han especificat les dates de la última consulta, la qual s'ha realitzat per comprovar que la pàgina web es troba vigent.

Revistes Electròniques consultades:

- Kluwer Academic Publisher (1966-2010), Journal of materials science, Vols. 1-45. London; Dordrecht.

Manuais consultats:

Manual Càmera Termogràfica: Cámara Termográfica TH9100 MR/WR Manual de Instrucciones. Insatec Electrónica. p. 8-125.

NEC San-ei Instruments, Ltd. "Image Processing Program (NS9300 Image Processor Pro II): User's Manual".

Articles:Articles facilitats per Elisabetta Rosina:

Elisabetta Rosina (2005) Metodi di analisi preliminare del degrado per i Beni Culturali. - Politecnico di Milano.

Elisabetta Rosina (2007). Politecnico di Milano. Il ruolo del laboratorio di ricerca universitario nell'intervento sul costruito. MEDICI Framework Editore, Milano.

Elisabetta Rosina, Giuseppina Suardi (2007). L'adeguamento impiantistico in edifici storici: procedure per il controllo degli effetti sulle superfici interne. Milano.

Elisabetta Rosina, Nicola Ludwig, Valeria Pracchi, Giuseppina Suardi (2008). Compatibilità e durabilità dei restauri degli affreschi in condizioni microclimatiche severe. Ed. Arcadia, Venezia.

Elisabetta Rosina (2004). Diagnostics for the preservation plans of diffused historical heritage. Milano.

Elisabetta Rosina, Hugo Wilfredo Torres Reyna, Gloria Brocchi, Chiara Faliva, Simona D'Ascola (2007), Indagini sulle problematiche conservative legate all'umidità. Milano.

Emanuela Daffra, Roberta Grazioli, Elisabetta Rosina, Lucia Contessi (2007). Un ciclo del cinquecento o un ambiente dell'ottocento? Indagini propedeutiche al restauro del salone di Ulisse nella palazzo della provincia di Bergamo. Milano.

E. Rosina, N. Ludwig, A. Sansonetti, F. Gerenzani, V. Pracchi, M. Gargano (2010). La Prevenzione del danno e prestazioni dei trattamenti conservativi: metodi diagnostici innovativi per applicazioni in situ. Bressanone.

E. Rosina, S. Della Torre, S. D'Ascola, S. Caglio (2005) Restauri a rischio: microclima e differenze superficiali dei materiali in opera. Sommario. Milano.

E. Rosina, N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, S. Della Torre, V. Pracchi and G. Suardi (2008). IRT Monitoring in planned preservation of built cultural heritage. CNR, Florence.

E. Rosina, S. della Torre and P. Gasparoli (2007), Localizing Historical clues using IRT and petrographic analyses at Villa Mirabello, Monza (Italy). Lisbona.

N. Ludwig, E. Rosina, A. Sansonetti (2007). New IRT procedures for the evaluation of stone's water exchange characteristics in Building. Orleans.

Paolo Beccarelli, Elena Romoli, Elisabetta Rosina and Alessandra Zanelli (2010). Textile shelters for archaeological areas: a change in the preservation of Cultural Heritage. Sofia.

Professors Vincent Shacklock, Elizabeth Hirst, Professor Norman R. Weiss, Bob Kindred MBE, Professor Peter Swallow (2009). Journal of architectural conservation. Ed. UK. Vol. 15, N°1.

Roberto Cassani, Lucia Cattoni, Deborah D'Elia, Laura Lazzaroni, Elisabetta Rosina. (2008) Ogg.: XXIV° CONVEGNO INTERNAZIONALE SCIENZA E BENI CULTURALI 2008 089. Un problema di conoscenza: l'oratorio di Sant'Alberto a Caselle.

Stefano Gizzi, Daniela Scudino, Stefano Della Torre, Elisabetta Rosina and Massimo Valentinic (2007), Karst soil and rising damp in sassai: guide lines for restoration of canopoleno complex. Orleans.

Stefano Della Torre, Elisabetta Rosina, Chiara Faliva, Michela Catalano. (2006), Sperimentazione di tecniche analitiche integrate per la diagnostica finalizzata alla conservazione preventiva. Ed. Firenze, Siena.

U. Baldini, P.A. Vigato (2006). The discovery of a forgotten pictorial cycle: Casa Vasari in Florence. Ed. Polistampa. Firenze.

Valeria Pracchi, Elisabetta Rosina Politecnico di Milano, Dipartimento BEST (2006). Effetti della temperatura superficiale della pavimentazione sul degrado dei rivestimenti e sul microclima. Ed. Arcadia, Venezia.

Articles facilitats per Kàtia Gaspar (Departament de Construccions arquitectòniques II):

Antonio Colantonio (2001). The use of infrared thermography in detection, remediation and commissioning of thermal comfort problems in office buildings. Vol. 4360. Ed. Spie. Canadá.

Arq. Javier María Bonavera (2006). Termografía Infraroja. Análisis y diagnósticos en Edificios. Buenos Aires.

Eva Roldán Saso, Rodrigo Vásquez Torres. Termografía IR & Test de infiltraciones Blower Door. Zaragoza.

Ignacio Cañas Guerrerol, Silvia Martín Ocaña, Ignacio González Requena (2003). Aplicabilidad de la Termografía para la inspección de los edificios rurales: caso de una comarca española. Madrid.

John R. Kominsky, James S. Luckino, AIA, Thomas F. Martin (2005). Passive Infrared Thermography—A Qualitative Method for Detecting Moisture Anomalies in Building Envelopes. Worthington.

RCi, Roof Consultants, Inc (2005). Infrared Thermography and the building Envelope.

Walter Wild (2007). Application of infrared thermography in civil engineering. Vol. 13. Germany.

Visites a empreses:

Termografics C/ Lluís Companys, 66, 08401 Granollers (Barcelona)

info@termografics.com

Catàlegs d'empreses comercials consultats:

- Testo
- Flyr
- Termagraf
- Ursa
- Climait
- Finstral
- Isover
- TermoFitex

6. ÍNDEX DE FIGURES I TAULES

Figura 2.1: Imatge propagació ona electromagnètica	7	Figura 2.38: Condensació provocada per l'aire fred exterior i l'aire humit interior causant floridures	28
Figura 2.2: Espectre electromagnètic, regió visible per l'ull humà	7	Figura 2.39: Procés de funcionament de la càmera termogràfica	31
Figura 2.3: Exemple de diferents bandes de l'espectre electromagnètic	8	Figura 2.40: Imatge d'una mateixa façana captada amb càmeres termogràfiques diferents	31
Figura 2.4: Esquema emissió de radiació d'un objecte en funció de la seva temperatura	8	Figura 2.41: Imatge de l'angle de visió d'un píxel	31
Figura 2.5: Moviment de les molècules en l'interior d'un cos	9	Figura 2.42: Imatge del punt a mesurar posicionat en diferents píxels, on es farà una mitjana de temperatura, i imatge del punt posicionat en un píxel	32
Figura 2.6: Escales de temperatura en °C (Celsius) i K° (Kelvin)	9	Figura 2.43: Part posterior de la càmera termogràfica TH 9100/MRWR	33
Figura 2.7: Esquema Llei de transferència de calor	9	Figura 2.44: Part frontal de la càmera termogràfica TH 9100/ MRWR	34
Figura 2.8: Diagrama de variació de la humitat relativa en funció de la Temperatura °C	10	Figura 2.45: Part posterior-esquerra de la càmera termogràfica TH 9100/MRWR	34
Figura 2.9: Gràfic de la variació de pressió en funció de la Temperatura	11	Figura 2.47: Imatge on es mostra el rang, el camp i el nivell en la càmera termogràfica	35
Figura 2.10: Gràfic on s'observa el punt de rosada i l'estat de l'aire	11	Figura 2.48: Tecles del panell de funcions de la càmera termogràfica	35
Figura 2.11: Imatge condensacions en terra i paret	11	Taula 2.49: Descripció de les funcions de les tecles principals de la càmera termogràfica	35
Figura 2.12: Mecanismes de transmissió de calor	12	Taula 2.50: Comparació entre les característiques de la Termometria i la Termografia	38
Figura 2.13: Imatge infraroja d'un local interior	13	Figura 2.51: Imatges de mesura amb un termòmetre IR i amb una càmera termogràfica	38
Figura 2.14: Imatge habitació calefactada amb infiltracions d'aire de l'exterior	14	Figura 3.1: Imatge angle de captació imatge infraroja	40
Figura 2.15: Diagrama espectre electromagnètic, mostrant la longitud d'ona, en metres	14	Figura 3.2: Cinta adhesiva d'emissivitat coneguda ($\epsilon = 0,95$)	41
Figura 2.16: Esquema radiació incident	15	Figura 3.3: Esquema determinació de la temperatura de la radiació reflectida	42
Figura 2.17: Esquema radiació sortint	15	Figura 3.4: Imatge infraroja d'un paper d'alumini arrugat	42
Figura 2.18: Esquema final Llei radiació de Kirchhoff's	16		
Figura 2.19: Prototip d'un cos negre perfecte	17		
Figura 2.20: Imatge d'un simulador de cos negre	17		
Figura 2.21: Gràfic d'energia emesa per un objecte a diferents temperatures	18		
Figura 2.22: Imatge esquemàtica experiment Frederick William Herschel	19		
Figura 2.23: Pèrdues d'energia a través de la canalització	26		
Figura 2.24: Ubicació exacta d'una fuga en terra radiant	26		
Figura 2.25: Paret amb humitats	26		
Figura 2.26: Control del procés d'assecat d'una solera de formigó	27		
Figura 2.27: Imatge termogràfica d'una vivenda d'obra nova	27		
Figura 2.28 i Figura 2.29: Ponts tèrmics en els panells envidriats i en la columna	27		
Figura 2.30: Façana Oest Old City Jail Charleston South Carolina (USA)	27		
Figura 2.31: Absis del santuari Lavello a Calolziocorte	27		
Figura 2.32: Imatge de fuga d'aire degut a l'absència d'aïllament i segellament	28		
Figura 2.33: Imatge on s'observa un aïllament deficient en una zona de la coberta	28		
Figura 2.34 i Figura 2.35: Inspecció de radiadors i terra radiant	28		
Figura 2.36 i Figura 2.37: Pèrdua d'energia en el conducte de la xemeneia	28		

7. AGRAÏMENTS

M'agradaria finalitzar aquest projecte donant les gràcies a totes aquelles persones que han estat presents durant la realització del mateix, en especial als meus tutors de seguiment, Montserrat Bosch González i Francesc de Paula Jordana, per la col·laboració en la realització de les imatges termogràfiques dels diferents edificis i pel seu constant seguiment.

Agrair al laboratori d'Edificació la seva disponibilitat en tot moment de l'equip termogràfic, així com en l'assessorament per part de Kàtia Gaspar en relació a les normatives associades a aquest tema.

També m'agradaria fer esment d'una persona professional en aquesta matèria, Elisabetta Rosina, amb la qual em vaig posar en contacte, i no va dubtar en enviar-me tota la informació necessària per entendre l'essència de la Termografia.

Als meus companys de seguiment del Projecte, Sergi Lloberas, Luis Enrique Guilleumas, Omar Marcos, David Gilberte i David Molina per la seva disposició en introduir aquesta tècnica als seus Projectes Finals de Grau, i estar interessats en fer un anàlisi termogràfic dels seus edificis.

Finalment agrair el recolzament en tot moment dels meus familiars, els quals han viscut en primera persona l'evolució del projecte, aportant-me recolzament constant.

ANNEX 1: ANÀLISI TERMOGRÀFIC EDIFICIS (APLICACIÓ PRÀCTICA A CASOS REALS)

ANNEX 1

ANÀLISI TERMOGRÀFIC EDIFICIS (APLICACIÓ PRÀCTICA A CASOS REALS)

Contingut

1. ESTUDI PRÀCTIC (IN SITU) APLICAT A CASOS REALS

1.1 MÈTODE DE TREBALL

- 1.1.1 EQUIPS DE MESURA
- 1.1.2 MÈTODE D'ANÀLISI DE LES IMATGES TÈRMiques
- 1.1.3 CONDICIONS AMBIENTALS
- 1.1.4 TREBALLS PREVIS

1.2 ANÀLISI TERMOGRÀFIC COL·LEGI LESTONNAC

- 1.2.1 INTRODUCCIÓ
- 1.2.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DE L'EDIFICI
- 1.2.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI
 - 1.2.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI
 - 1.2.3.2 PLÀNOLS DE L'EDIFICI:
- 1.2.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS
- 1.2.5 PROPOSTES D'ACTUACIÓ
- 1.2.6 CONCLUSIONS

1.3 ANÀLISI TERMOGRÀFIC COL·LEGI CEIP DOCTOR FERRAN I CLUA

- 1.3.1 INTRODUCCIÓ
- 1.3.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DE L'EDIFICI
- 1.3.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI
 - 1.3.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI
 - 1.3.3.2 PLÀNOLS DE L'EDIFICI
- 1.3.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS
- 1.3.5 PROPOSTES D'ACTUACIÓ
- 1.3.6 CONCLUSIONS

1.4 ANÀLISI TERMOGRÀFIC ESCOLA ISABEL DE VILLENA

- 1.4.1 INTRODUCCIÓ
- 1.4.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DE L'EDIFICI

1.4.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI

- 1.4.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI
- 1.4.3.2 PLÀNOLS DE L'EDIFICI

1.4.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS

1.4.5 PROPOSTES D'ACTUACIÓ

1.4.6 CONCLUSIONS

1.5 ANÀLISI TERMOGRÀFIC INSTITUT NARCÍS MONTURIOL

1.5.1 INTRODUCCIÓ

1.5.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DE L'EDIFICI

1.5.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI

- 1.5.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI
- 1.5.3.2 PLÀNOLS DE L'EDIFICI

1.5.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS

1.5.5 COMPARACIÓ ENTRE ELS RESULTATS OBTINGUTS EN L'ANÀLISI DE L'EDIFICI REALITZAT AL MES DE MAIG I L'ANÀLISI DEL MES DE DESEMBRE

1.5.6 PROPOSTES D'ACTUACIÓ

1.5.7 CONCLUSIONS GENERALS

1.6 ANÀLISI TERMOGRÀFIC UNITAT DE LA MANÇANA DE L'EIXAMPLE

1.6.1 INTRODUCCIÓ

1.6.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DELS EDIFICIS

1.6.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI

- 1.6.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI
- 1.6.3.2 PLÀNOL EIXAMPLE

1.6.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS

1.6.5 PROPOSTES D'ACTUACIÓ

1.6.6 CONCLUSIONS

1.7 CONCLUSIONS FINALS DEL CONJUNT EDIFICATORI ANALITZAT: COMPARACIÓ DELS RESULTATS OBTINGUTS

ÍNDEX DE FIGURES I TAULES (ANNEX 1)

Figura 1.1: Càmera infraroja NEC TH 9100 MR-WR.

Figura 1.2: Psicròmetre digital PCE-310

Figura 1.3: Càmera Digital BENQ

Figura 1.4: Plànol de situació de l'edifici Lestonnac

Figura 1.5 i Figura 1.6: Imatges façana exterior Lestonnac

Figura 1.7: Plànol Planta Soterrani

Figura 1.8: Plànol Planta Baixa

Figura 1.9: Plànol Planta Primera

Figura 1.10: Plànol Planta Segona

Figura 1.11: Plànol Planta Tercera

Figura 1.12: Plànol Planta Quarta

Figura 1.13: Plànol Planta Cinquena

Figura 1.14: Plànol Planta Coberta

Taula 1.15: Fitxa de recollida de dades

Figura 1.16: Gràfic comportament tèrmic línia 1 i 2

Figura 1.17: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.18: Gràfic comportament tèrmic línia 1 on es pot visualitzar el salt tèrmic que existeix en un mateix element constructiu, de la planta tercera a la planta quarta

Figura 1.19: Línia 1 de perfil amb la distribució tèrmica corresponent.

Figura 1.20: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.21: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.22: Imatge ampliada de l'entrant ornamental de la finestra

Figura 1.23: Gràfic comportament tèrmic línia 1

Figura 1.24: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.25: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.26: Gràfic i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 1.27: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.28: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.29: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.30: Plànol de situació de l'edifici Doctor Ferran i Clúa

Figura 1.31: Imatges de les diferents façanes de l'edifici i de la planta coberta

Figura 1.32: Plànol Planta Semi-soterrani

Figura 1.33: Plànol Planta Baixa

Figura 1.34: Plànol Planta Primera

Taula 1.35: Fitxa de recollida de dades

Figura 1.36: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.37: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.38: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.39: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.40: Detall del pont tèrmic en la trobada del forjat amb la façana i pont tèrmic en la trobada del pilar amb la façana

Figura 1.41: Gràfic i perfil del comportament tèrmic línia 1 on es pot visualitzar la temperatura en diferents punts d'un mateix element constructiu

Figura 1.42: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.43: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.44: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.45: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.46: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.47: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.48: Gràfic i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 1.49: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.50: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.51: Gràfic i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 1.52: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.53: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.54: Plànol de situació de l'edifici escolar Isabel de Villena

Figura 1.55: Imatges de les diferents façanes de l'edifici

Figura 1.56: Plànol Planta Soterrani

Figura 1.57: Plànol Planta Principal pati

Figura 1.58: Plànol Planta Baixa

Figura 1.59: Plànol Planta Primera

Figura 1.60: Plànol Planta Segona

Figura 1.61: Plànol Planta Tercera

Figura 1.62: Plànol Planta Coberta

Taula 1.63: Fitxa de recollida de dades

Figura 1.64: Gràfic del comportament tèrmic línia 1

Figura 1.65: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.66: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.67: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.68: Detalls constructius trobada brancal amb fusteria exterior i trobada ampit amb fusteria exterior

Figura 1.69: Gràfic del comportament tèrmic línia 1

Figura 1.70: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.71: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.72: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.73: Histogrames de distribució de Temperatura del rectangle 1 i 2

Figura 1.74: Histograma de distribució de Temperatura de la Imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.75: Histogrames de distribució de Temperatura del rectangle 1 i Imatge infraroja

Figura 1.76: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.77: Gràfic línia 1 i 2, i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 1.78: Gràfic línia 1 i 2, i perfil del comportament tèrmic línia 2

Figura 1.79: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.80: Histogrames de distribució de Temperatura del rectangle 1 i 2

Figura 1.81: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.82: Histogrames de distribució de Temperatura del rectangle 2 i 3

Figura 1.83: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.84: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.85: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.86: Gràfic línia 1 i 5, i Histograma del rectangle 4

Figura 1.87: Perfils del comportament tèrmic línia 1 i 5

Figura 1.88: Esquema recorregut energia i gràfic del comportament tèrmic línia 1 i 2

Figura 1.89: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.90: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 1.91: Histograma de distribució de Temperatura de la Imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 1.92: Gràfic comportament tèrmic línia 1 on es pot visualitzar la temperatura en diferents punts d'un mateix element constructiu

Figura 1.93: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 1.94: Plànol de situació de l'edifici Doctor Ferran i Clúa

Figura 1.95: Imatges de les diferents façanes de l'edifici

Figura 1.96: Planta semi-soterrani

Figura 1.97: Planta Baixa

Figura 1.98: Planta primera

Taula 1.99: Fitxa de recollida de dades al mes de Maig

Taula 2: Fitxa de recollida de dades al mes de Desembre

Figura 2.1: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.2: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 2.3: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja

Figura 2.4: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.5: Detall secció façana Oest, gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.6: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.7: Secció constructiva façana Oest

Figura 2.8: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja

Figura 2.9: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.10: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.11: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja

Figura 2.12: Detall secció façana planta baixa i planta primera, Gràfic línia 2 i perfil del comportament tèrmic línia 2

Figura 2.13: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.14: Histogrames de distribució del rectangle 3 i de la imatge infraroja

Figura 2.15: Detall trobada forjat amb façana i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.16: Detall trobada mur de coronació de la façana Sud amb coberta

Figura 2.17: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja

Figura 2.18: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.19: Detall secció constructiva façana i gràfic línia 1 i 2

Figura 2.20: Perfil del comportament tèrmic línia 1 i 2

Figura 2.21: Histograma de la Imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.22: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.23: Detall trobada parament de façana amb voladiu.

Figura 2.24: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.25: Histogrames de distribució del rectangle 2 i 3

Figura 2.26: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.27: Gràfic línia 2 i perfil del comportament tèrmic línia 2

Figura 2.28: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja

Figura 2.29: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.30: Histogrames de distribució del rectangle 2 i de la imatge infraroja

Figura 2.31: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.32: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja

Figura 2.33: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.34: Detall constructiu trobada forjat amb tancament de façana

Figura 2.35: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.36: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.37: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja

Figura 2.38: Secció constructiva parament de façana i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.39: Histogrames de distribució del rectangle 2 i 4

Figura 2.40: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.41: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja

Figura 2.42: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.43: Simulació de radiació directa en façana Est, en els mesos de Juny i Gener respectivament

Figura 2.44: Plànol de situació de la mançana de l'Eixample

Figura 2.45: Plànol Districte de l'Eixample

Figura 2.46: Imatges de les façanes dels edificis de la mançana de l'Eixample

Figura 2.47: Plànol parcel·lació mançanes de l'Eixample

Taula 2.48: Fitxa de recollida de dades

Figura 2.49: Gràfic línia 2 i perfil del comportament tèrmic línia 2

Figura 2.50: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja

Figura 2.51: Representació en 3D de la imatge infraroja Figura 2.52: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.53: Secció tipus façana de construcció Tradicional

Figura 2.54: Histograma de distribució i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.55: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.56: Histograma de distribució i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.57: Gràfic línia 3 i 4 i perfil del comportament tèrmic línia 3 i 4 respectivament

Figura 2.58: Histogrames de distribució del rectangle 1, 2 i de la imatge infraroja

Figura 2.59: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.60: Histogrames de distribució del rectangle 3 i de la imatge infraroja

Figura 2.61: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja

Figura 2.62: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.63: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.64: Pont tèrmic per llinda de la finestra

Figura 2.65: Histogrames de distribució del rectangle 2 i de la imatge infraroja

Figura 2.66: Secció tipus de la façana de Construcció Tradicional

Figura 2.67: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.68: Histogrames de distribució del rectangle 3, 5 i de la imatge infraroja

Figura 2.69: Histogrames de distribució del rectangle 2 i 3

Figura 2.70: Histograma de distribució i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.71: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.72: Histogrames de distribució del rectangle 3 i de la imatge infraroja

Figura 2.73: Representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.74: Histogrames de distribució del rectangle 1 i del rectangle 5

Figura 2.75: Histograma de distribució i representació en 3D de la imatge infraroja

Figura 2.76: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1

Figura 2.77: Histogrames de distribució del rectangle 4 i de la imatge infraroja

Gràfic 2.78: Percentatge de la distribució de pons tèrmics en l'edifici Isabel de Villena

Taula 2.79: Valors dels ponts tèrmics obtinguts del càlcul dels elements constructius

CALENDARI VISITES TERMOGRÀFIQUES:

MARÇ 2012

Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
Anàlisi Termogràfic Col·legi Lestonnac 19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	Anàlisi Termogràfic CEIP Doctor Ferran i Clúa 30	31	

ABRIL 2012

Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
Anàlisi Termogràfic Escola Isabel de Villena 16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

MAIG 2012

Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
	1	2	3	4	5	6
7	Anàlisi Termogràfic IES Narcís Monturiol 8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

JULIOL 2012

Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	Anàlisi Termogràfic Mançana de l'Eixample 17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

DESEMBRE 2012

Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
					1	2
3	4	Anàlisi Termogràfic IES Narcís Monturiol 5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

1. ESTUDI PRÀCTIC (IN SITU) APLICAT A CASOS REALS

Una vegada treballats els conceptes teòrics de la Termografia, procedim a aplicar-los, realitzant inspeccions Termogràfiques en edificis, on es preveuen pèrdues energètiques. L'objectiu d'aquest projecte consisteix en analitzar termogràficament l'envolvent d'edificis escolars, dels quals s'han realitzat o s'estan realitzant auditories energètiques com a Projectes Finals de Grau, així com una mànana de l'Eixample, per donar continuïtat a les dades obtingudes fins ara, i introduir aquesta nova tècnica avançada a Projectes Finals de Grau del ram de l'Edificació. La Termografia, ens facilitarà dades importants i informació innovadora sobre l'estat actual de l'edifici (diferències de temperatura i pèrdues energètiques), que corroboraran i justificaran fets dins d'una avaluació energètica. Amb aquesta metodologia d'anàlisi, es treballarà sobre l'estalvi d'energia, així com en la importància del progrés de l'eficiència energètica en els edificis.

1.1 MÈTODE DE TREBALL

El mètode de treball està enfocat a la realització de mesures in situ. En aquest mètode d'anàlisi, es tindran en compte totes les alteracions que poden afectar a la mesura, tal i com s'ha exposat anteriorment en l'apartat 3 "Estudi pràctic", de la teoria de la Termografia.

Per poder realitzar una correcta inspecció termogràfica, es farà seguiment de la norma ISO EN 13187:1999, la qual ens serveix de guia per treballar sobre tots els conceptes necessaris a tenir presents, i la informació mínima a obtenir durant aquest procés d'anàlisi, enfocat a la detecció d'irregularitats tèrmiques en la pell dels edificis.

Le pautes de seguiment exposades en aquesta norma, fan referència a un anàlisi termogràfic en exteriors, que s'adaptin a l'estudi pràctic del present projecte, el qual s'ha realitzat a l'aire lliure. També es consultarà els articles facilitats per Elisabetta Rosina, on s'exposa l'anàlisi termogràfic de restauracions d'edificis antics, i d'on podem extreure dades per realitzar un correcte seguiment.

1.1.1 EQUIPS DE MESURA

Durant les inspeccions termogràfiques realitzades en aquest projecte, s'han utilitzat els següents equips:

- Càmera termogràfica: S'ha utilitzat la càmera termogràfica NEC TH9100, la qual es compon per un sensor de radiació infraroja, que detecta temperatures, i genera una imatge tèrmica. A l'apartat 2.5 de la teoria de la Termografia, es treballa detalladament sobre les característiques d'aquest aparell.



Figura 1.1: Càmera infraroja NEC TH 9100 MR-WR. (Font: Insatec).

- Psicròmetre digital PCE-310: Amb aquest aparell es pot determinar el clima ambiental (humitat i temperatura ambiental) i la temperatura superficial de les parets (mitjançant el sensor de temperatura exterior). Aquest instrument també ofereix informació sobre la temperatura del punt de rosada i la temperatura de l'esfera humida. Té una capacitat de resposta de 60 segons aproximadament, un rang de mesura intern de temperatura de -20 a + 50 °C i d'humitat relativa de 0 a 100%, i un rang de mesura extern de temperatura de -20 a + 70 °C. La resolució de temperatura és de 0,1 °C, d'humitat relativa és de 0,1 %, i la precisió de temperatura és de ± 1 K i d'humitat relativa ± 3 %.



Figura 1.2: Psicròmetre digital PCE-310 (Font: PCE Inst.)

- Càmera digital per poder fotografiar les zones que s'estan inspeccionant. Amb la càmera termogràfica s'obtenen imatges infraroges i visuals, però aquestes últimes tenen una qualitat baixa, per aquest motiu treballarem amb una càmera digital com a recolzament.



Figura 1.3: Càmera Digital BENQ (Font: BENQ España)

- Cinta mètrica: Ens servirà per mesurar la distància a la que s'ha realitzat la presa de la imatge.

- Rellotge: Ens servirà per poder consultar a l'hora que s'inicien i es finalitzen les inspeccions termogràfiques, així com l'hora en la qual s'ha pres la imatge.
- Software de tractament de dades: Necessitem un ordinador per poder instal·lar els softwares Image Processor Pro II i Report Generator Lite, programes que ens ajudaran a treballar sobre les dades obtingudes amb la càmera termogràfica.

1.1.2 MÈTODE D'ANALISI DE LES IMATGES TÈRMiques

Tal i com s'ha exposat en l'apartat 3.4 "Anàlisi de les imatges tèrmiques" de la Teoria de la Termografia, existeixen dos tipus d'anàlisi de les imatges infrarojes: L'anàlisi quantitatiu i l'anàlisi qualitatiu.

Durant l'anàlisi termogràfic d'aquests edificis, es treballaran sobre mesures quantitatives directes, ja que el paràmetre que es coneixerà serà la temperatura del material i no l'emissivitat. Aquesta temperatura es mesurarà a partir d'un termòmetre de contacte de la superfície, i mitjançant la càmera termogràfica es determinaran els punts a mesurar. Una vegada mesurada la temperatura superficial d'aquest punt, s'estudiarà la diferència d'emissivitat.

1.1.3 CONDICIONS AMBIENTALS

Tal i com he citat anteriorment, l'anàlisi termogràfic de les façanes s'ha realitzat a l'aire lliure (a l'exterior de l'edifici). Per aquest motiu, s'han tingut present els aspectes ambientals que poden influir en la mesura de la imatge tèrmica, els quals s'han exposat en l'apartat 3.2 "L'objecte mesurat i el seu entorn" de la Teoria de la Termografia.

Les inspeccions termogràfiques del present projecte, s'han realitzat a última hora del dia i a primera hora del matí (depenent de la planificació de la visita a les Escoles, i l'època de l'any), entre els mesos de Març i Desembre, per evitar l'efecte de la radiació solar o treballar amb radiació solar mínima, que no afecti a la mesura obtinguda. La radiació solar, pot provocar reflexions provinents d'altres fonts o emmascarament de punts calents, que poden dificultar la interpretació de termogrames o la presència temperatures d'objectes errònies, per aquest motiu es treballa amb una ona llarga (8-15 μm) ja que capta amb més dificultat les reflexions solars i és més sensible a les radiacions de baixa temperatura de l'entorn.

També s'ha escollit realitzar les inspeccions termogràfiques dies ennuvolats, ja que els núvols eviten el pas dels raigs solars de manera directa, eludint també els dies de forta precipitació (ja que poden distorsionar els resultats). En referència a la presència de corrents d'aire, s'ha evitat realitzar les

inspeccions termogràfiques els dies de fortes corrents d'aire, ja que alteren el resultat final, provocant un refredament de les superfícies objecte d'anàlisi per convecció i conseqüentment reduint el gradient tèrmic.

En general, i després d'haver realitzat inspeccions a primera hora del matí i a última hora de la tarda, cal destacar que és preferible efectuar les inspeccions a última hora del dia, de tal manera que es tinguin en compte els sistemes que han estat en funcionament i la presència d'ocupants durant tot el dia. D'aquesta manera, existiran diferències de temperatura entre interior i exterior més notables, i es visualitzaran més fàcilment les pèrdues energètiques, a més de poder visualitzar detalladament els sistemes estructurals de l'edifici, i poder treballar directament sobre l'estructura i el sistema constructiu.

Cal remarcar, que l'època de l'any també influeix en una presa correcta de la imatge tèrmica. Els mesos d'hivern, facilitaran la inspecció termogràfica, ja que la diferència de temperatura entre interior i exterior és elevada. En el nostre cas, s'han realitzat les inspeccions durant els mesos de Març i Desembre, amb lo que s'ha hagut de treballar amb més deteniment durant el treball in situ, per poder veure les pèrdues energètiques. En els mesos més calorosos, s'ha facilitat la visualització de pèrdues energètiques ja que la temperatura interior era més baixa (per l'aire condicionat), i la temperatura exterior més elevada. Tot i això, es recomana treballar els mesos d'hivern, on es podran veure amb més fiabilitat els punts crítics en una imatge tèrmica.

1.1.4 TREBALLS PREVIS

Prèviament a la inspecció termogràfica, s'han de tenir presents diferents factors que comportaran una presa correcta de les imatges termogràfiques. Aquests factors són:

- Coneixement de l'equip NEC TH 9100 MR-WR (capacitat de l'equip, resolució, etc.), i necessitat d'equips complementaris durant la inspecció.
- Característiques dels materials a analitzar (radiació de la superfície, etc.)
- Presència de fonts de radiació que provoquin irradiació sobre l'objecte a mesurar.
- Obtenció de plànols i informació sobre l'edifici.
- Factors ambientals i climàtics 24 hores abans de la inspecció, i durant la inspecció.
- Distància càmera- objecte.
- Angles d'incidència entre la càmera i l'objecte.
- Data i hora de la inspecció
- Realització d'un full de recollida de dades necessàries.
- Instal·lació i coneixement de l'ús dels softwares

1.2 ANÀLISI TERMOGRÀFIC COL·LEGI LESTONNAC

En aquest anàlisi termogràfic, es pretén avaluar l'estat actual del tancament de façana de l'escola Lestonnac, fent recerca de possibles punts crítics, mostrant les possibilitats de la tècnica termogràfica com a eina per localitzar d'una manera ràpida i eficaç els defectes constructius i les ineficiències energètiques, d'aquest edifici reconstruït fa 71 anys.

1.2.1 INTRODUCCIÓ

L'edifici objecte d'estudi, fa referència a un edifici escolar que es troba ubicat al centre de Barcelona, en la confluència entre els carrers d'Aragó 284 i Pau Claris 131. Aquest xamfrà es troba orientat al Nord, la façana del carrer Pau Claris es troba orientada al Nord-Est, la façana del carrer Aragó es troba orientada a Nord-Oest i la façana interior del pati de mançana, està orientada al Sud-Oest.

L'edifici ocupa en la seva totalitat una superfície de sòl de 3814 m² i una superfície construïda d'aproximadament 7000 m², repartida en diferents usos (ensenyament, religió, comercial i industrial).

La part de l'edifici del Carrer Pau Claris i Carrer Aragó, està comprés entre els anys 1874-1875, on es va construir una Planta Soterrani, una Planta Baixa i 2 Plantes Pisos. Durant la Guerra Civil (1936-1939), i degut a un incendi, l'edifici va quedar pràcticament en ruïna, i a l'any 1941 es van començar a reconstruir les zones de l'edifici incendiades, així com es va realitzar l'ampliació del mateix, afegint quatre pisos més i la coberta.

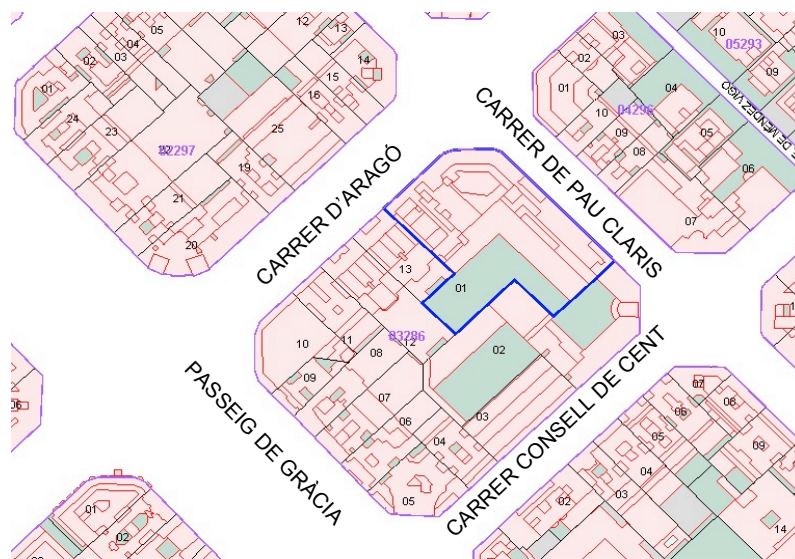


Figura 1.4: Plànol de situació de l'edifici Lestonnac (Font: Sede Catastro)

1.2.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DE L'EDIFICI

El Col·legi consta de Planta Soterrani, Planta Baixa, 6 Plantes Pisos i Planta Coberta, pati interior de mançana dedicat a activitats esportives i esbarjo, i un altell en Planta Baixa, on es troba l'actual biblioteca. En aquest anàlisi termogràfic, treballarem la part de l'edifici gestionada pel Col·legi Lestonnac, que es dedica a l'educació primària, secundària i batxillerat, la qual ocupa una superfície de 6000 m², de la superfície total de l'edifici.

El sistema estructural de l'edifici (Arquitectura Contemporània 1936-1960), es basa en parets de càrrega, pilars i forjats unidireccionals, tancaments de fàbrica de maó massís, revestides exteriorment per estucs i altres materials (pedra natural) i coberta transitable, tradicional a la catalana.

L'envolvent de l'edifici està constituïda per parets de diferents gruixos. Els tancaments exteriors de tota la façana del Carreu Pau Claris (Nord-Oest), són de 50 cm de gruix, compostos per parets de fàbrica de maó massís, estuc exterior, rematat amb pedra natural en els ampits. La part interior es compon d'una capa de guix i de pintura. La façana Nord i la del carrer Aragó (Sud-Est), tenen el mateix acabat tant exterior com interior que la façana del carrer Pau Claris, però el gruix del tancament és d'uns 35 cm. La façana interior de l'edifici Sud-Oest és d'un gruix de 35 cm, i està composta de maó massís i arrebossat exterior pintat, i l'acabat interior enguixat i pintat. En planta baixa hi ha un aplacat de marbre tipus "pedra Sant Vicens", que arriba fins a la cornisa que es troba horitzontalment, fins a l'alçada de la planta primera, a partir d'on comença l'acabat estucat.

La fusteria és de fusta massissa amb vidre simple de 3 mm de gruix, exceptuant la façana Sud-Oest on els tancaments practicables tenen fusteria de PVC amb trencament de pont tèrmic i acabat decoratiu en fusta, i amb doble vidre.

1.2.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI

1.2.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI:



Figura 1.5 i Figura 1.6: Imatges façana exterior Lestonnac (Font: Elaboració pròpia)

1.2.3.2 PLÀNOLS DE L'EDIFICI:
PLANTA SOTERRANI

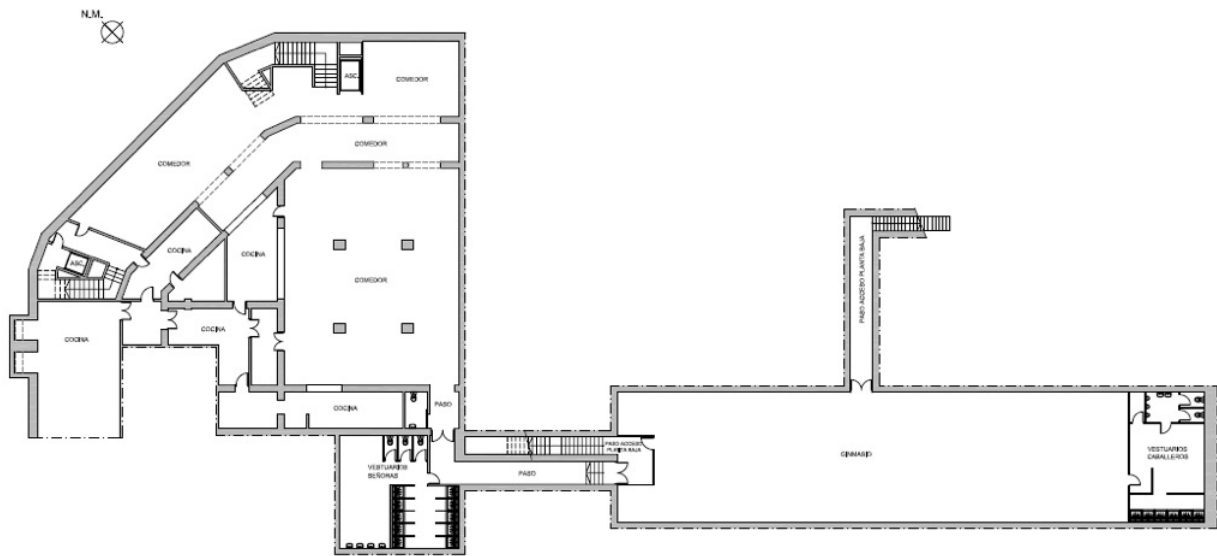


Figura 1.7: Plànol Planta Soterrani

PLANTA BAIXA

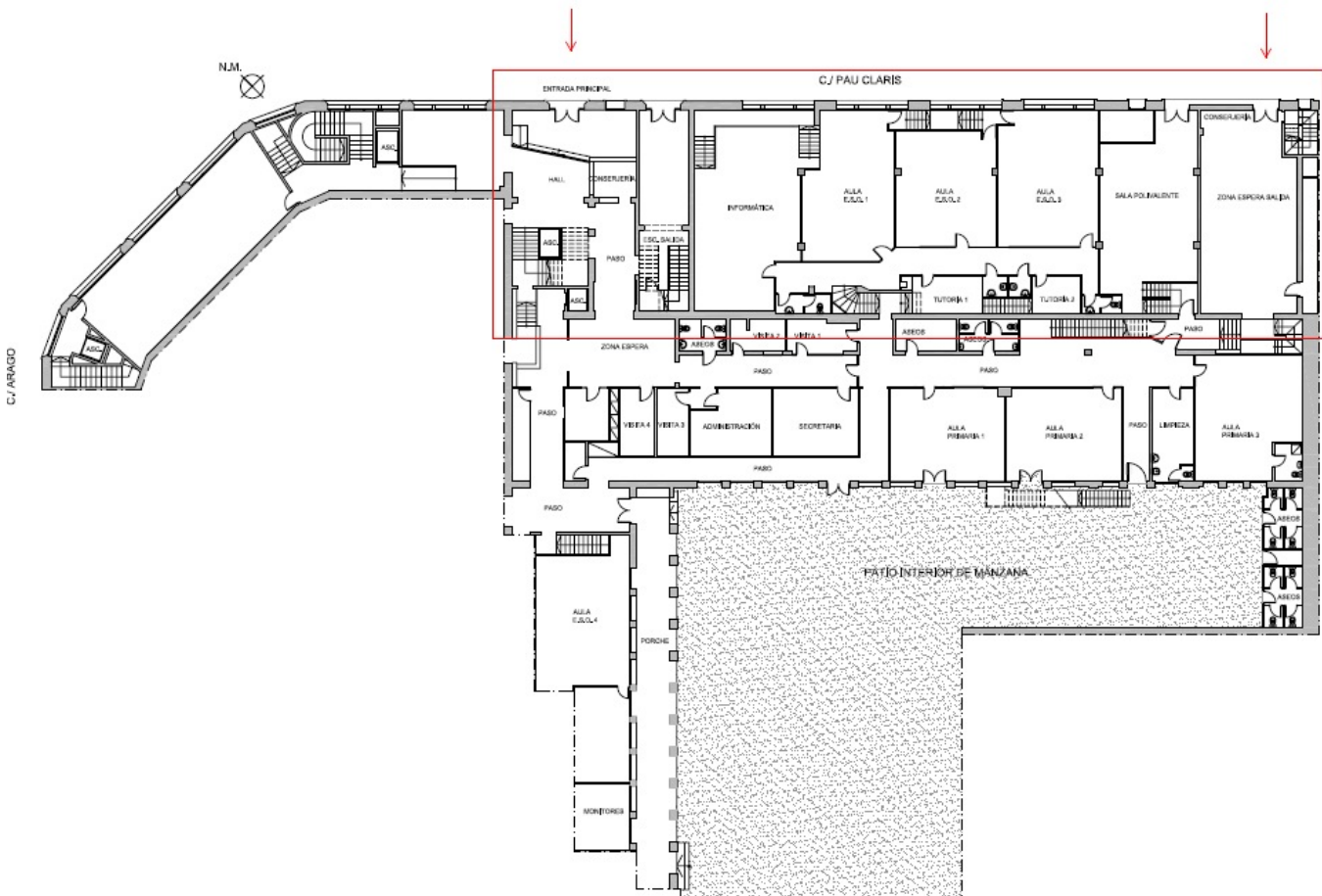


Figura 1.8: Plànol Planta Baixa

PLANTA PRIMERA

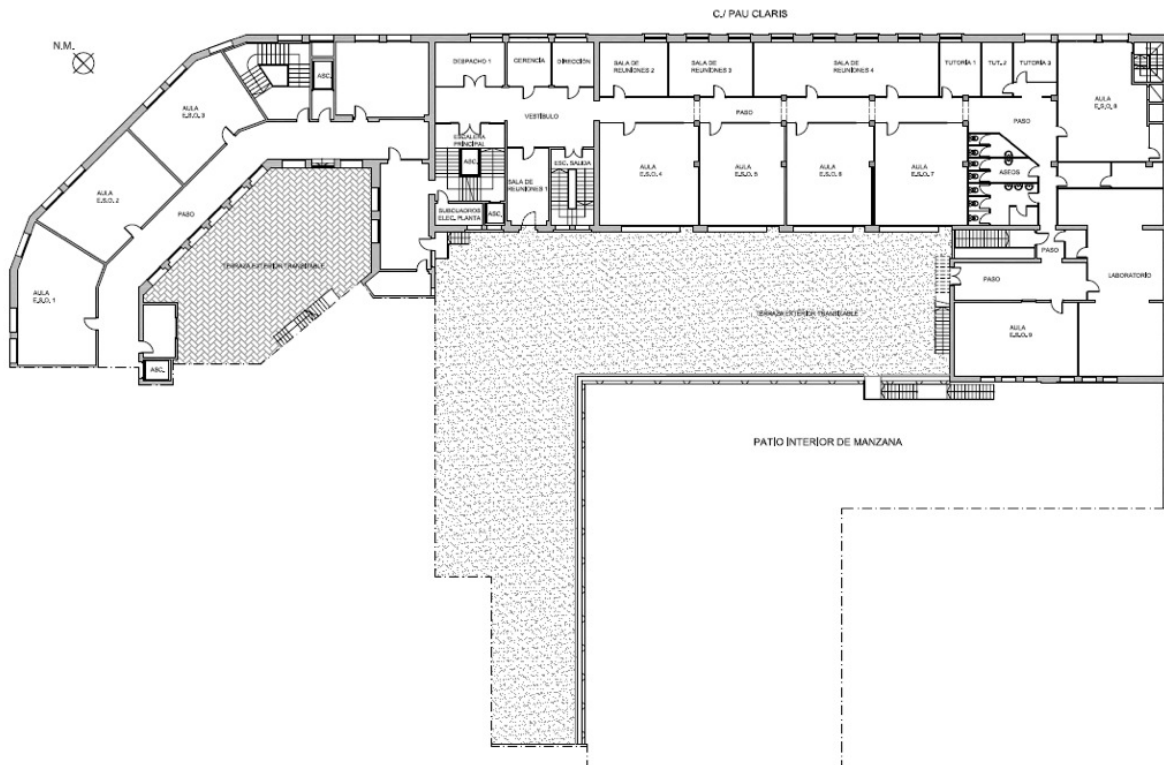


Figura 1.9: Plànol Planta Primera

PLANTA SEGONA

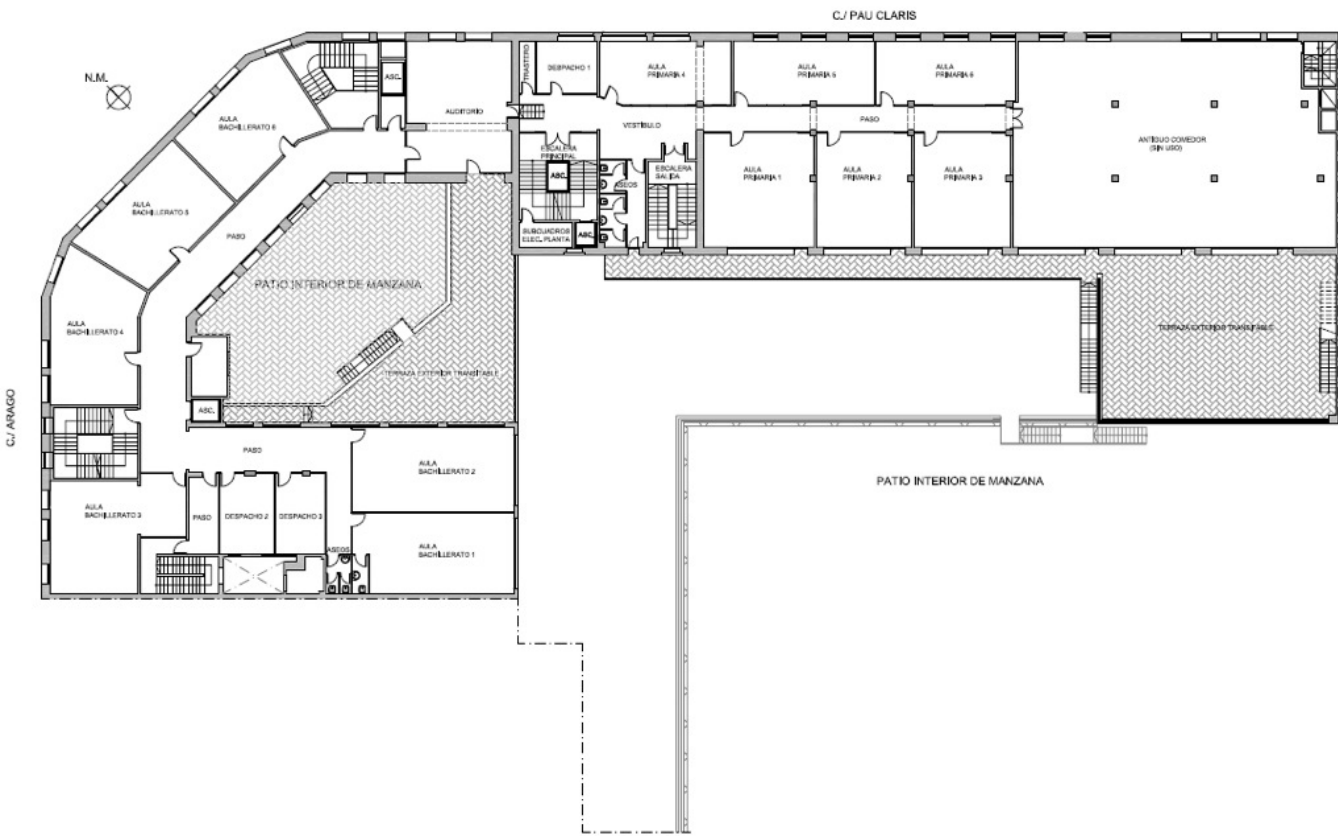


Figura 1.10: Plànol Planta Segona

PLANTA TERCERA

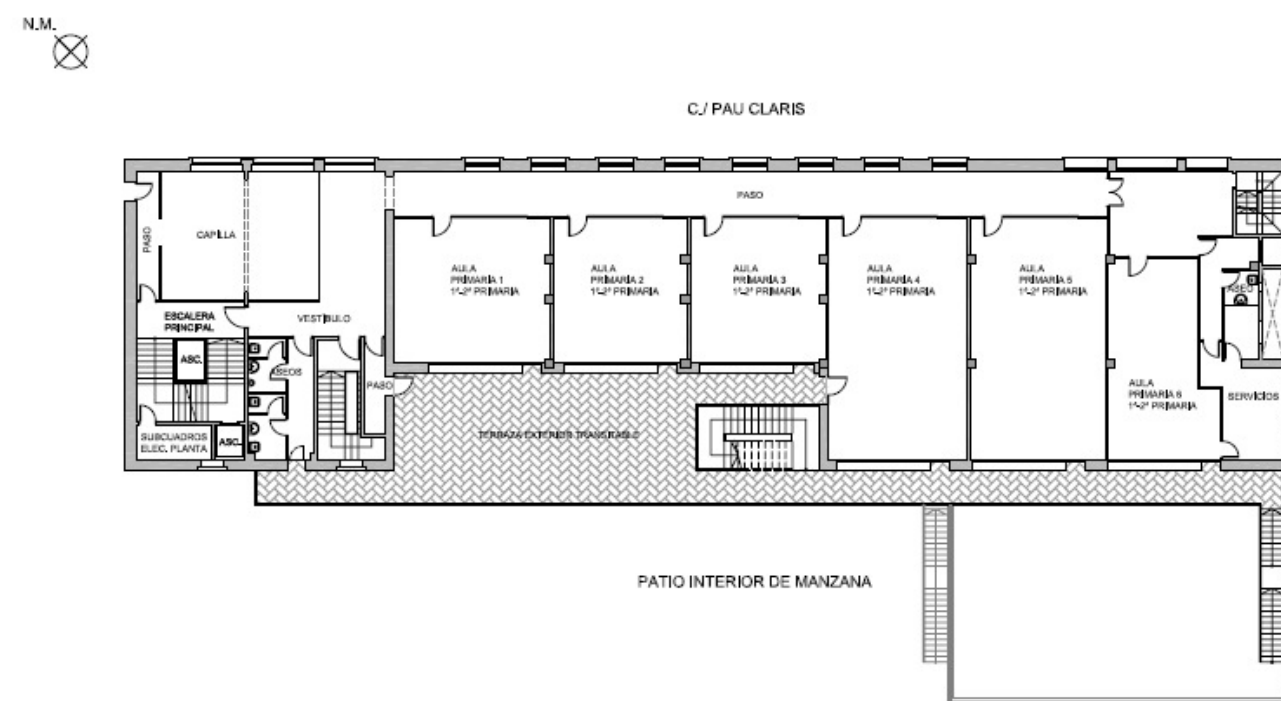


Figura 1.11: Plànol Planta Tercera

PLANTA QUARTA

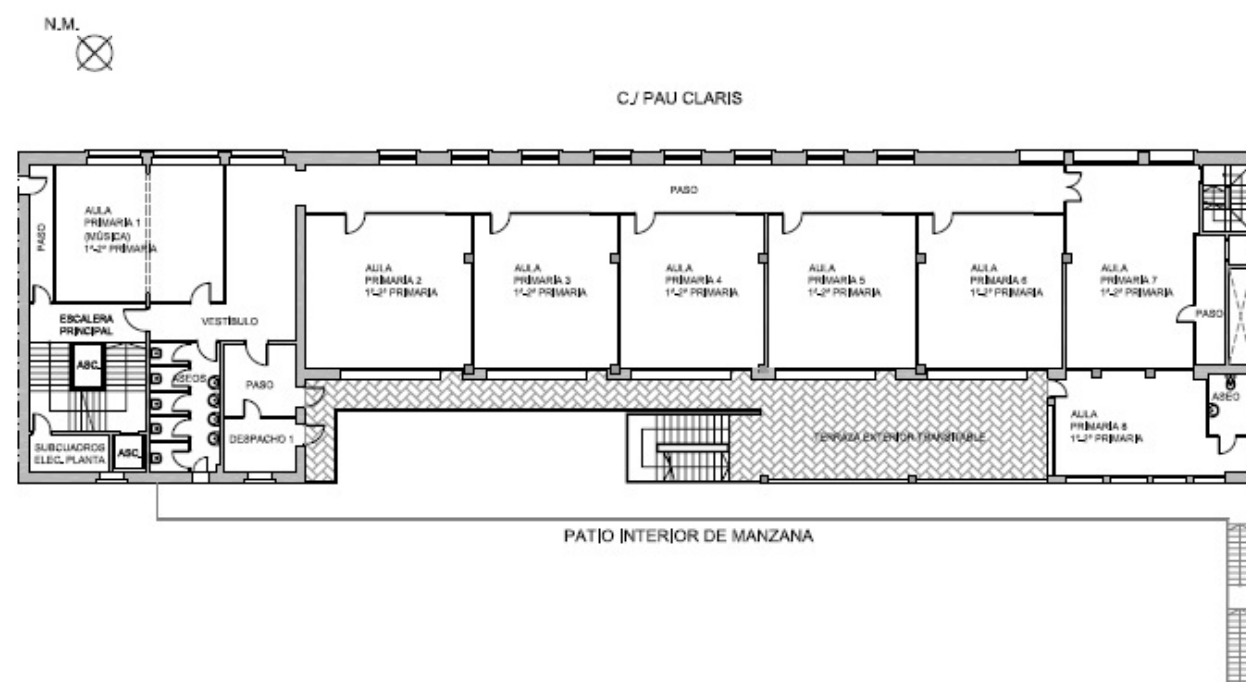


Figura 1.12: Plànol Planta Quarta

PLANTA CINQUENA

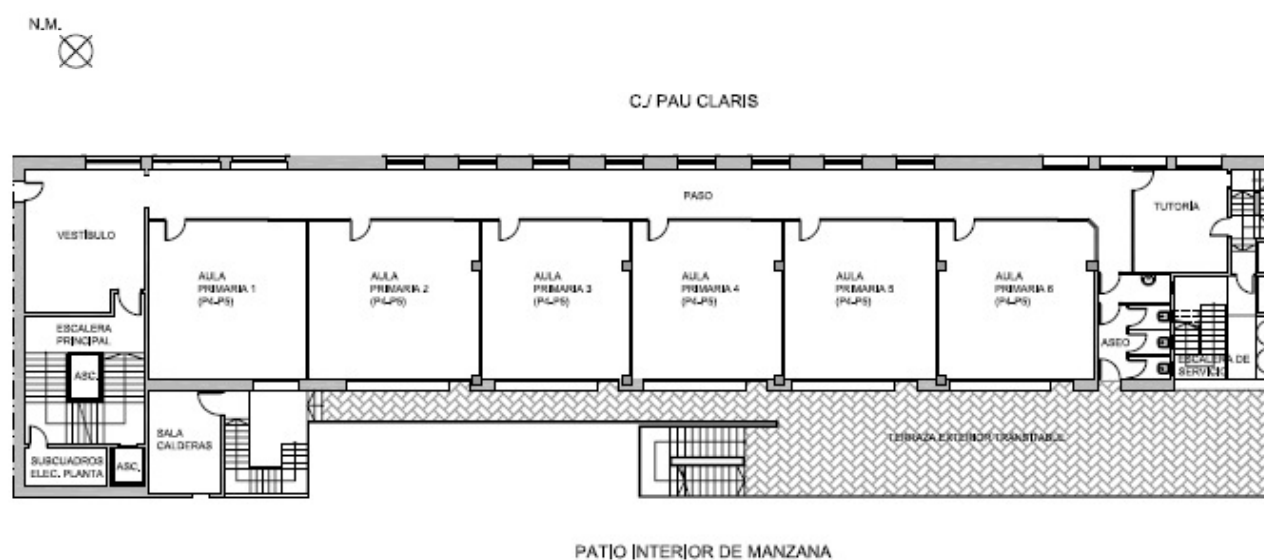


Figura 1.13: Plànol Planta Cinquena

PLANTA COBERTA

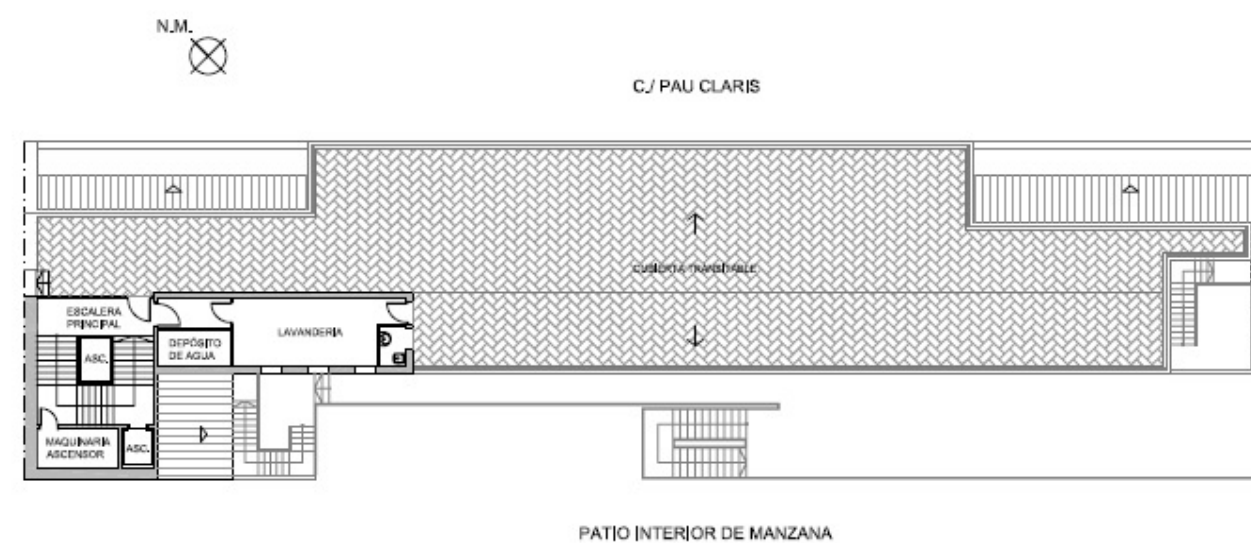


Figura 1.14: Plànol Planta Coberta

1.2.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS

L'avaluació energètica que s'ha realitzat en aquesta Escola, per part d'altres companys, ha servit per determinar la necessitat d'implementar diverses actuacions en l'edifici, amb la finalitat de reduir les elevades pèrdues energètiques que pateixen les aules de l'escola. La majoria d'aquestes dissipacions energètiques són fruit de l'antiguitat de l'edifici, i per tant del desconeixement en aquell moment dels avanços que s'han anat produint en el camp de l'estalvi energètic.

Per duu a terme aquest estudi energètic, s'han utilitzat diferents equips de mesura, tals com: un luxòmetre i diferents higròmetres, que han servit per analitzar diferents variables.

Posteriorment amb aquest projecte s'ha complementat lavaluació amb l'ús d'una càmera termogràfica, la qual ens ha aportat dades numèriques, i imatges reals de la situació de l'edifici. Fet que ajuda a entendre amb facilitat l'estat de l'edifici, i és una mesura que pot ajudar a fer comprendre als usuaris la necessitat de realitzar canvis.

Les dades de la inspecció termogràfica s'han recollit amb una fitxa de recollida de dades, que s'exposa a continuació:

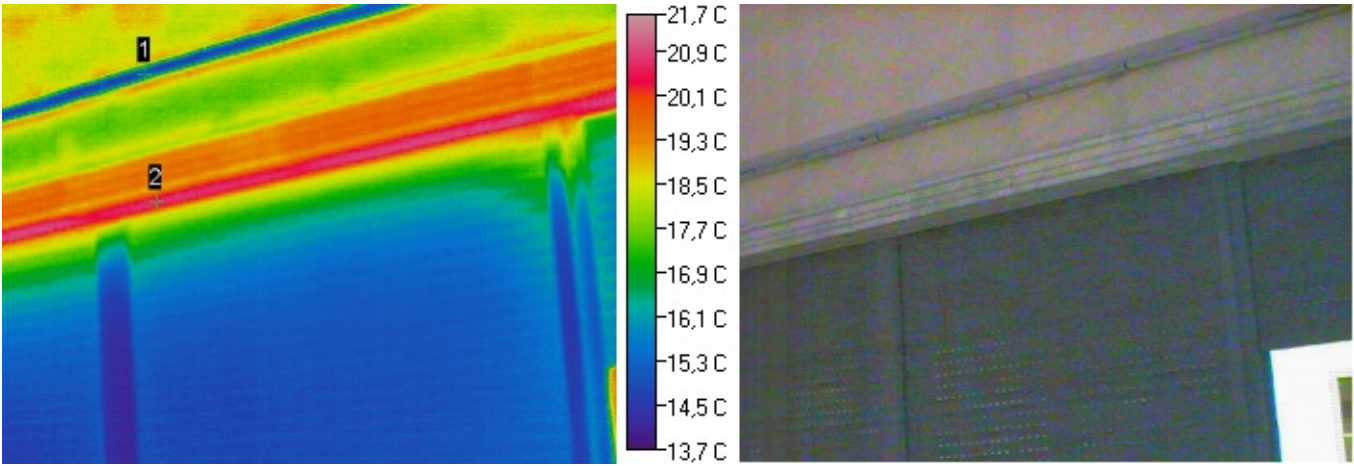
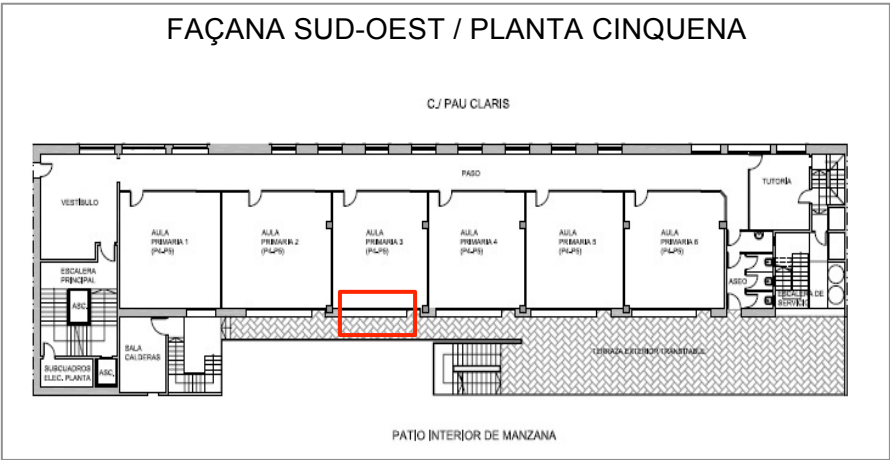
Localitat	Adreça	Nº	Vent: Direcció i velocitat	Orientació	Dia/mes/any	Hora Inici anàlisi	Estat del cel	Temp. Exterior	H % Exterior	Hora fi anàlisi
Barcelona	C/ Pau Claris amb C/ Aragó	131 (Pau Clarís) 284 (Aragó)	29 km/h	Altitud 95	19 / 03 / 2012	19,20 h	Ennuvolat	14 °C	71 %	20,45 h

Nº Presa	Ubicació	Distància presa del termograma	Tº Exterior	Tº exterior 24 hores abans	Tº Interior	Tº Superficial	H % Exterior	H % interior	Observacions
TH910003 TH910004 TH910007	Aula Planta 5 (Interior Edifici, Façana S-E)	3 m	13,9 °C	19 °C	22,1 °C	22,9 °C	71%	37,5 %	S'analitza una de les classes amb més temperatura interior (22,1 °C), i per tant, la més incòmode segons opinions dels usuaris.
TH910008	Passadís interior (Planta 5) limitant amb la classe anterior	1,5 m	13,9 °C	19 °C	20,6 °C	19,9 °C	70,8 %	36,2 %	Paret del passadís. Correspon a una paret de façana, ja que limita amb el pati interior de l'Escola. Absència de vegetació, ni edificis frontals que puguin produir ombra.
TH910005	Bany (Planta 5)	2 m	13,8 °C	18,2 °C	19,8 °C	19,0 °C	70,7 %	43,0 %	La finestra del bany estava oberta.
TH910009	Caixa d'escala (claraboia coberta interior)	10 m	13,6°C	17,3 °C	18,9 °C	-	70,7 %	40,3 %	La Caixa d'escala de l'interior de l'edifici es troba coberta per una claraboia; via de fuga de la temperatura interior, i per tant punt important d'anàlisi.
TH910010 TH910011 TH910012 TH910013 TH910014 TH910015 TH910016 TH910017	Pati interior, façana Sud-Oest	10 m	14,4 °C	17,3 °C	19 °C	15,3 °C 13,6 °C	53,2 %	41,2 %	En la Planta Baixa d'aquesta façana s'aprecia un canvi de material entre paret i pilar, amb una diferència de temperatura important. S'observa un número elevat de finestres en tot el parament, que cal tenir present durant l'anàlisi termogràfic.
TH910018 TH910019 TH910020 TH910021 TH910022	Façana Nord- Est, Carrer Pau Claris	20 m	12,8 °C	17,3 °C	19 °C	12,5 °C Marbre PB 12,4 °C Marbre negre 12,1 °C Pedra finestra	53 %	41,6 %	S'han mesurat les temperatures superficials dels diferents materials que componen la façana. Ens servirà per poder extreure conclusions més fiables d'emissivitats, i conseqüentment aportar resultats més precisos.

Taula 1.15: Fitxa de recollida de dades (Font: Elaboració pròpia, i Meteoclimatic.)

TERMOGRAMA 1:

- Ubicació:

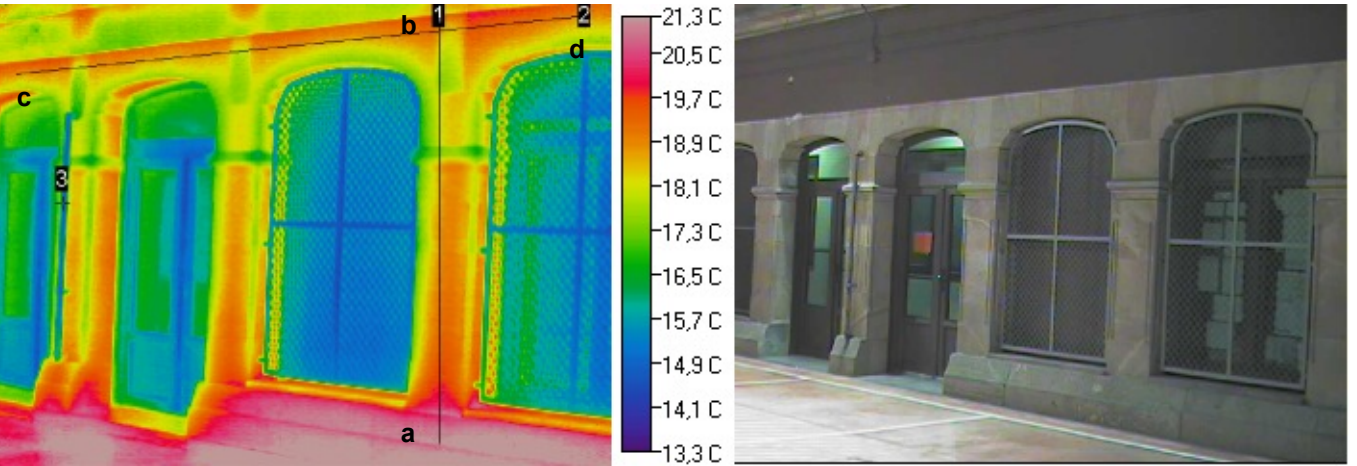


Punt	Temperatura	Emissivitat	Temperatura ambient	Distància
1	15,1 °C	0,96	14,4 °C	10 m
2	21,4 °C	0,93	14,4 °C	10 m

Al parament exterior de l'escola s'observen diferents cornises que es distribueixen linealment per tota la façana del pati interior. Si observem la imatge infraroja, es pot comprovar que les diferents cornises es troben a diferent temperatura. El punt 1 ens informa de que la temperatura en aquesta zona és de 15,1 °C, mentre que s'observa una pujada de temperatura en la cornisa del punt 2, la qual es troba exactament a 21,4 °C. Si ens fixem detingudament, podem observar que aquesta segona cornisa està situada sobre la caixa de persiana, la qual deduïm que no està aïllada i per on es produeixen pèrdues energètiques. En conseqüència aquest element de secció més gran acumula aquesta quantitat de calor, que és la que observem en la imatge infraroja. Cal destacar que no s'observa pont tèrmic pel marc de la finestra, ja que la fusteria d'aquesta façana, està dissenyada amb trencament de pont tèrmic.

TERMOGRAMA 2:

- Ubicació:



Línia/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mltjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud ¹
1	17,5 °C	21,6 °C	19,2 °C	0,95	14,4 °C	10 m	2,65 m
2	18,1 °C	19,9 °C	19,1 °C	0,95	14,4 °C	10 m	3,56 m
3	-	14,9 °C	-	0,79	14,4 °C	10 m	-

Ens situem en la Planta Baixa de l'edifici, exactament en el pati interior de l'escola, per visualitzar com es comporta tèrmicament el marbre que conforma l'acabat de la Planta Baixa. Segons la imatge infraroja s'observen diferents temperatures, degut a l'absència d'aïllament que provoca irregularitats tèrmiques. La línia 1 vertical, ens mostra com un mateix element constructiu, varia de temperatura en una mateixa alçada, fins arribar al forjat, com també la línia 2 que ens mostra com varia linealment la temperatura de la part superior de les portes i finestres, tractant-se d'un mateix element. El punt 3, es troba a una temperatura inferior ja que es tracta d'un tub metàl·lic.

¹ Longitud: Correspon a la longitud en metres de la línia col·locada en la imatge infraroja. Aquest valor el calcula el software a partir del valor de la distància de la presa del termograma, i el camp de visió de la càmera.

A continuació s'exposa gràficament la distribució lineal de temperatura de les línies 1 i 2 que s'han representat en la imatge termogràfica. Amb aquests gràfics es visualitza més fàcilment els salts tèrmics que existeixen en la façana:

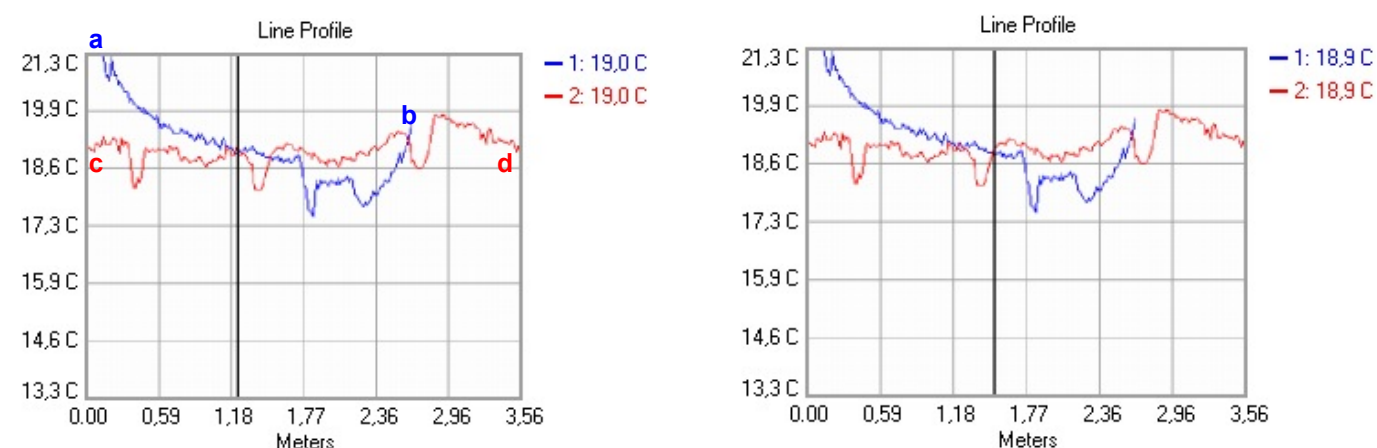


Figura 1.16: Gràfic comportament tèrmic línia 1 i 2 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

En aquests gràfics es mostren les diferents temperatures que figuren en el recorregut de les línies 1 i 2, així com el primer punt on les dues línies es tallen i tenen la mateixa temperatura de 19 °C i el segon punt on les dues línies arriben a tenir una mateixa temperatura de 18,9 °C. Observem que la línia 1, realitza un salt important de temperatura de 21,6 °C a 17,5 °C, ja que en la zona inferior del parament es troben ubicats els radiadors en funcionament de l'aula interior. En relació amb la línia 2, es pot comprovar els descensos reiterats de temperatura, que corresponen amb un canvi de la peça del marbre, que conforma l'acabat final de la façana de Planta Baixa. Amb aquests gràfics, s'observen les variacions de temperatura que pateix un mateix element constructiu en tota la seva secció.

Seguidament s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que es mostren en la imatge termogràfica en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), així com una imatge en 3D del termograma, o en es visualitzen amb claredat les diferents distribucions tèrmiques de la façana:

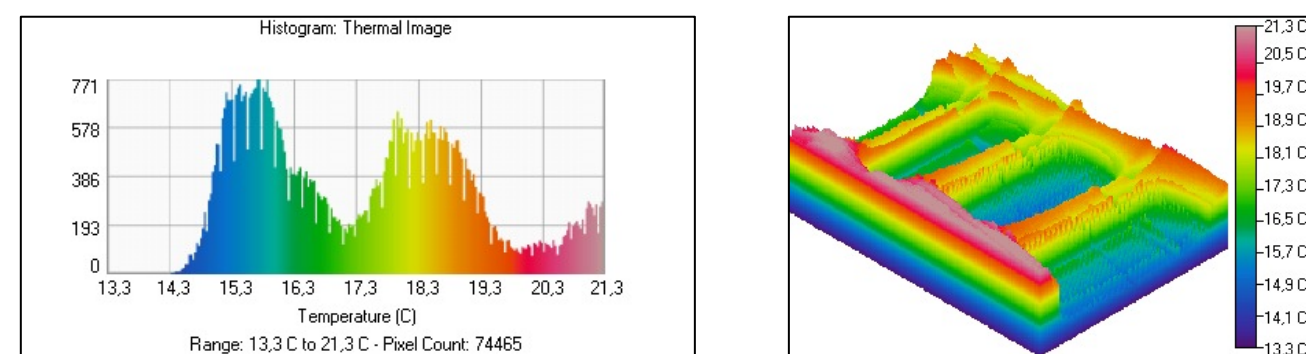


Figura 1.17: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

EXPLICACIÓ GENERAL INTERPRETACIÓ GRÀFICS:

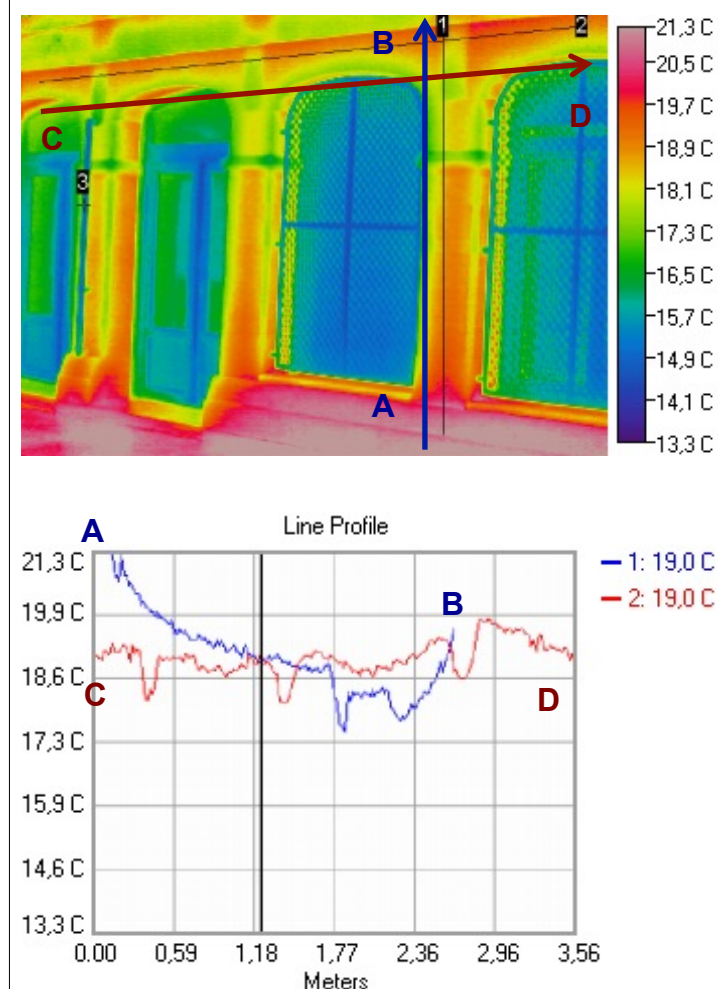
A continuació s'exposa una breu explicació sobre la interpretació dels gràfics que es presenten vers aquesta part pràctica del Projecte.

Els termogrames s'analitzen col·locant punts, àrees o línies amb les quals podem estudiar la temperatura exacte en un lloc específic, per obtenir dades de manera més detallada sobre una zona en concret.

Quan col·loquem una línia, posteriorment es presenten diferents gràfics on es poden veure els valors de temperatura que va patint la mateixa línia en funció del recorregut.

Les línies verticals, així com les línies horitzontals es representen en funció dels metres recorreguts (Eix x) i la temperatura a la qual es troba (Eix y), per tant sempre obtindrem una línia horitzontal en el gràfic, que anirà disminuint o augmentant en funció de la temperatura en aquell punt.

Exemple:



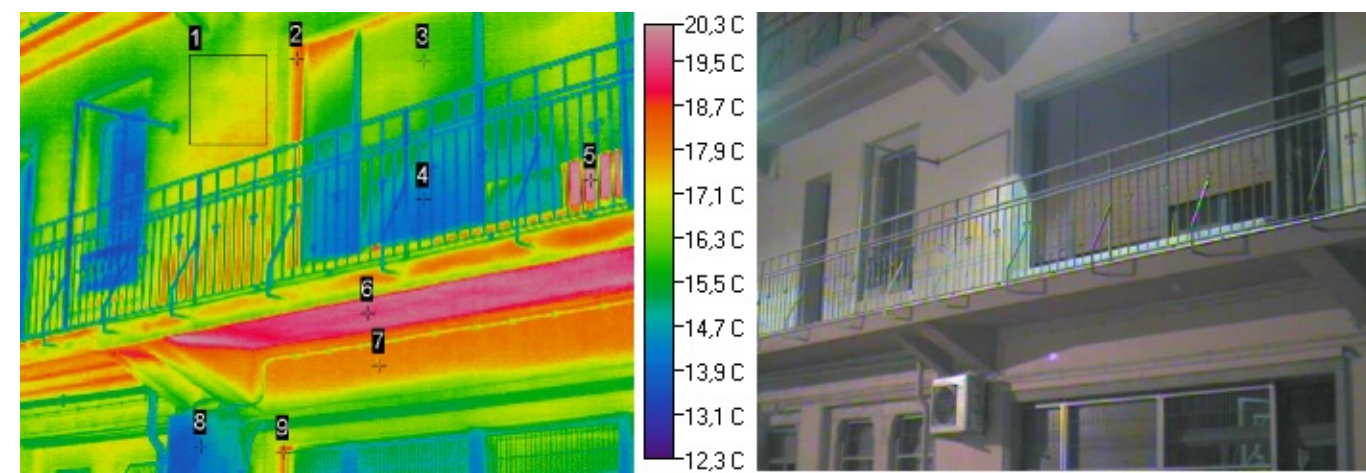
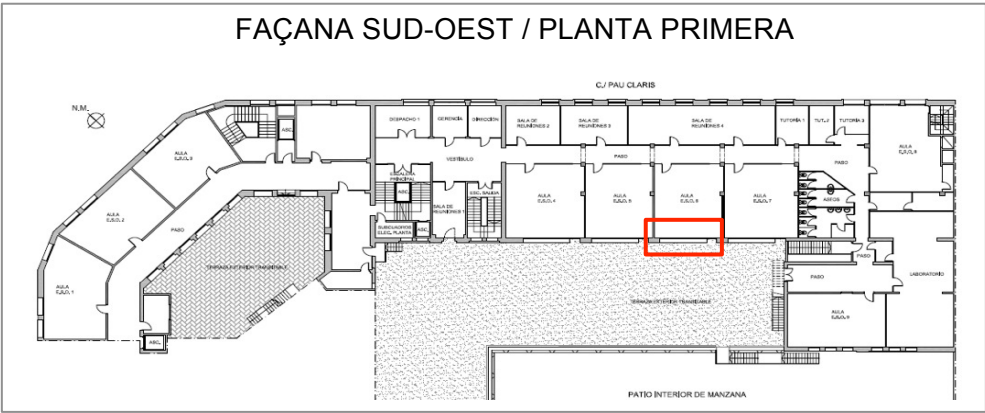
En la imatge infraroja s'han col·locat la línia 1 i 2, i el punt 3, ja que són zones que interessa analitzar de manera més detallada. En el gràfic es podrà comprovar a quina temperatura exacta es troba la façana en funció del recorregut de les línies.

La línia 1 (color blau), es representa des de la zona inferior (la qual es troba a més temperatura en el termograma, que es tracta de l'inici de línia 0,00 metres), a la zona superior (final de la línia). La línia 2 està representada d'esquerra (inici, punt 0,00) a dreta (final de la línia).

* La línia vertical negra generalment es col·loca posterior a la realització del gràfic, per estudiar la temperatura exacta en un punt en concret, com en aquest cas que es volia estudiar la temperatura exacta on es creuen les dues línies.

TERMOGRAMA 3:

- Ubicació:



Àrea/Punt	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea ² /Watts ³
1	16 °C	18 °C	17,2 °C	0,93	14,4 °C	10 m	0,28 m ² /5,94
2	-	18,4 °C	-	0,93	14,4 °C	10 m	-
3	-	16,6 °C	-	0,94	14,4 °C	10 m	-
4	-	14,1 °C	-	0,94	14,4 °C	10 m	-
5	-	20,2 °C	-	-	14,4 °C	10 m	-
6	-	19,9 °C	-	0,93	14,4 °C	10 m	-
7	-	18,2 °C	-	0,93	14,4 °C	10 m	-
8	-	12 °C	-	0,05	14,4 °C	10 m	-
9	-	18,3 °C	-	0,93	14,4 °C	10 m	-

² Àrea: És la superfície del rectangle que col·locat en la imatge infraroja. El software la calcula a partir de la distància en metres de la presa de la imatge introduïda, i el camp de visió de la càmera.

³ Watts: Es tracta d'un valor orientatiu que et calcula el software, corresponent a la quantitat de calor o flux de calor, expressat en W, que per conducció es transmet a través de la paret.

En aquesta imatge infraroja, observem que l'àrea 1, ens assenyala una part de la façana on trobem diferents temperatures. Aquest és un cas específic, ja que aquesta divergència de temperatures, es deu a una zona que es troba il·luminada per la llum artificial exterior del pati i per tant, aquest reflex, suposa un augment de temperatura de la zona en qüestió.

*Nota: És important saber distingir aquests detalls dins d'un anàlisi termogràfic, ja que aquests fets, poden comportar conclusions errònies a l'hora d'estudiar les pèrdues energètiques d'un edifici.

En el punt 2 i 9, detectem un increment important de temperatura a 18,4 °C, el que suposa que s'està produint una exfiltració d'aire calent interior, cap a l'exterior, per la part superior del marc de la finestra. Aquestes dissipacions energètiques, poden ser degudes a un incorrecte segellat del marc superior de la finestra a causa d'una incorrecta posta en obra. Arribem a aquesta conclusió, ja que si ens fixem detingudament en tots els perfils de la fusteria de les finestres, observem que només es produeixen pèrdues de calor per aquests dos punts, ja que en aquesta façana de l'edifici, la fusteria està dissenyada amb trencament de pont tèrmic.

Continuant analitzant el tema de les finestres, cal destacar que els dobles vidres que les componen, contribueixen a evitar ponts tèrmics. Podem justificar aquesta informació, observant la finestra esquerra de la imatge, la qual està a una temperatura molt baixa. En cas que existís un pont tèrmic, la temperatura hauria de ser elevada, ja que la temperatura interior és més alta que l'exterior.

En referència al punt 3 i 4, sobre les persianes, podem visualitzar que la part superior es troba a una temperatura de 16,6 °C, mentre que la part inferior es troba a una temperatura de 14,1 °C.

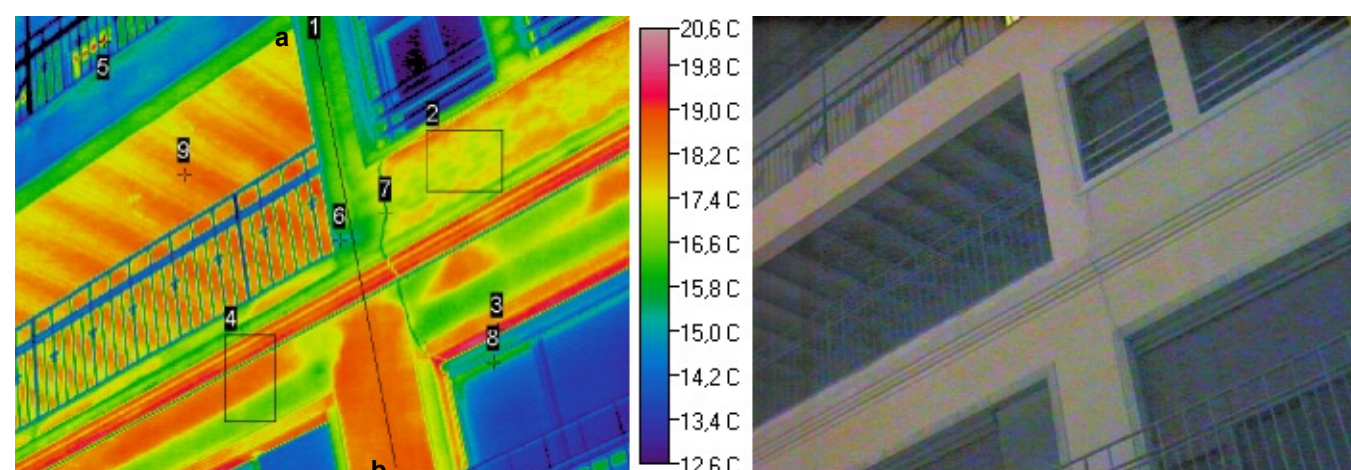
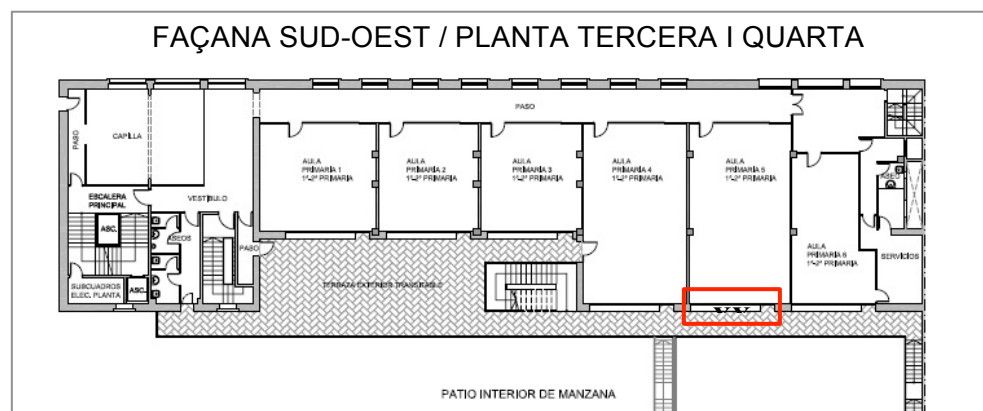
En el punt 5, es pot veure l'efecte d'una finestra oberta, deixant escapar l'aire calent interior, punt el qual es troba a la màxima temperatura de 20,2 °C.

En el punt 6, es pot visualitzar una clara pèrdua de calor per la part inferior de llosana que conforma el balcó de la planta primera. Es una via de sortida de l'aire calent interior. En el punt 7, també s'observa l'absència d'aïllament en la façana, i per on es s'estan produint pèrdues energètiques, ja que l'aula ha estat ocupada recentment, i els sistemes de calefacció es troben encesos.

En relació amb el punt 8, es tracta d'una màquina condensadora del sistema d'aire condicionat i bomba de calor que conforma la instal·lació de l'edifici. Aquesta es troba a una temperatura inferior, ja que està en funcionament, agafant aire fred exterior i convertint-lo en aire calent, per expulsar a l'interior.

TERMOGRAMA 4:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	15,5 °C	19,6 °C	17,5 °C	0,93	14,4 °C	15 m	4,01 m
2	16,4 °C	19,4 °C	17,7 °C	0,93	14,4 °C	15 m	0,41m²/10,37
3	-	20 °C	-	0,93	14,4 °C	15 m	-
4	15,1 °C	19,7 °C	18,1 °C	0,93	14,4 °C	15 m	0,39m²/11,09
5	-	18,5 °C	-	-	14,4 °C	15 m	-
6	-	15,5 °C	-	0,93	14,4 °C	15 m	-
7	-	16 °C	-	0,93	14,4 °C	15 m	-
8	-	15,9 °C	-	0,94	14,4 °C	15 m	-
9	-	18,7 °C	-	0,93	14,4 °C	15 m	-

En aquest termograma, s'observa clarament la irregularitat de temperatures que presenta la façana Sud-Oest.

Amb la línia 1, es vol demostrar com evoluciona la temperatura vers la façana, i com passem de tenir 19,6 °C a 15,5 °C (veure figura 1.18). Aquest salt tèrmic és degut a l'absència d'aïllament en tota la façana, el que provoca pèrdues energètiques pels tancaments de les aules, que es troben a una temperatura interior més elevada, ja que han estat ocupades més temps i amb els sistemes de calefacció encesos.

En l'àrea 2, es pot detectar el sistema constructiu de la façana compost per obra de fàbrica, la qual es troba a temperatura irregular. Aquestes diferències de temperatura es deuen, a que es tracta d'una aula, la qual ha estat desocupada fa unes hores, i la qual es troba a una temperatura interior, inferior a la resta d'altres aules. Això provoca, que algunes zones properes als radiadors encara es trobin a més temperatura que altres zones, i provoquin irregularitats de temperatura en els ampits de les finestres.

A continuació es presenten tres gràfics amb les diferents temperatures de la línia 1:

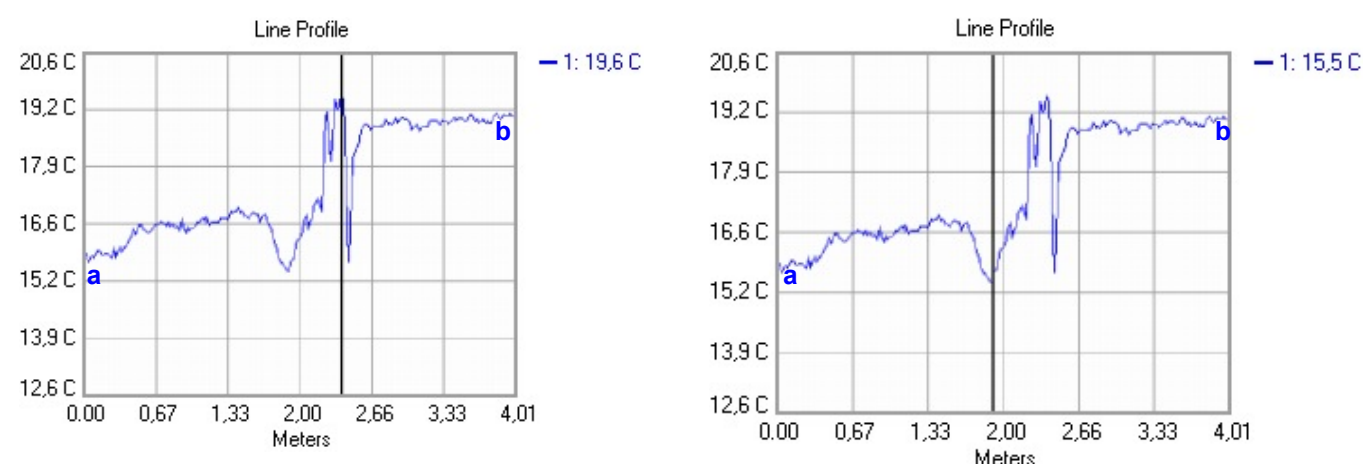


Figura 1.18: Gràfic comportament tèrmic línia 1 on es pot visualitzar el salt tèrmic que existeix en un mateix element constructiu, de la planta tercera a la planta quarta (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

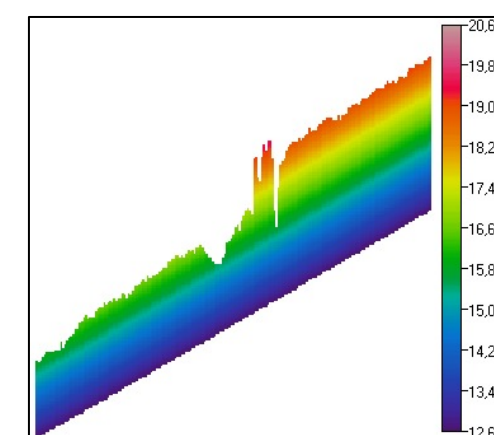


Figura 1.19: Línia 1 de perfil amb la distribució tèrmica corresponent. (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

El punt 3 i 5, fan referència a la caixa de persiana de les aules inferiors, les quals tenen una temperatura interior alta, per on observem que es produeixen pèrdues energètiques, degut a la manca d'aïllament, o a al desgast del mateix

A l'àrea 4 es poden observar ponts tèrmics discontinus, que demostren la irregularitat en l'execució del forjat.

En referència al punt 6, ens indica una part de la façana de la planta quarta on existeix retenció d'humitat.

El punt 7, ens mostra una senyal que ha deixat el recorregut d'un doll d'aigua, la qual crea humitat, trobant-se a baixa temperatura.

El punt 8, ens indica una zona de la persiana la qual es troba a més temperatura que la resta de l'element. Aquest canvi tèrmic, és degut a l'angle en el qual s'ha pres la imatge, i per tant, ens pot provocar mesures confoses a l'hora de valorar la imatge infraroja.

Finalment, el punt 9, ens assenyalava el forjat superior de la planta quarta, el qual està compost de bigues de fusta i volta de maó massís. Si visualitzem el termograma, podem detectar que la temperatura de l'aula superior, es veu reflectida en el seu forjat inferior, per on s'estan produint pèrdues energètiques a l'exterior.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels):

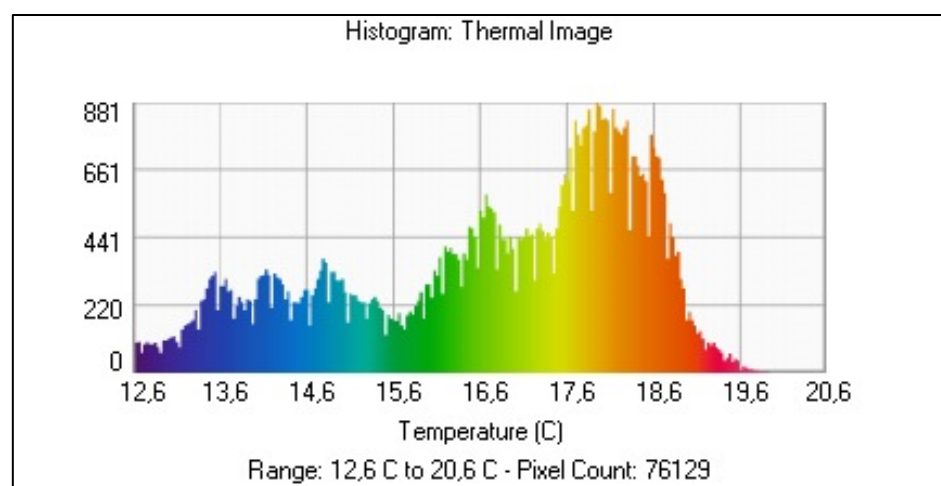


Figura 1.20: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

Seguidament es presenta una imatge en 3D, del termograma, o en es visualitzen amb claredat les diferents distribucions tèrmiques de la façana:

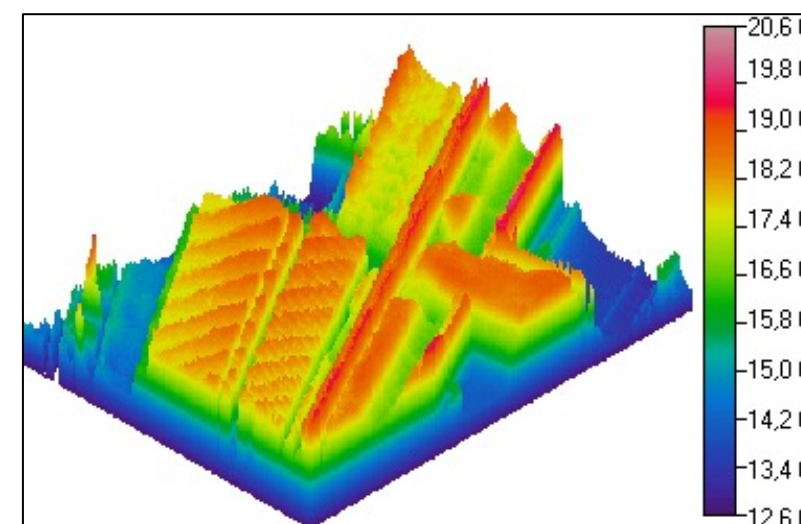
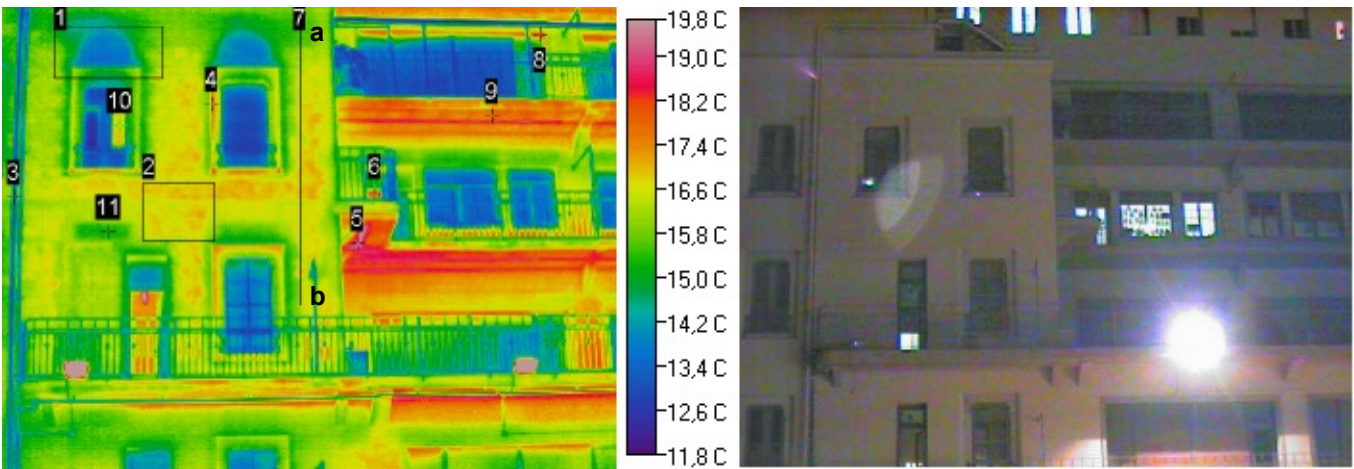
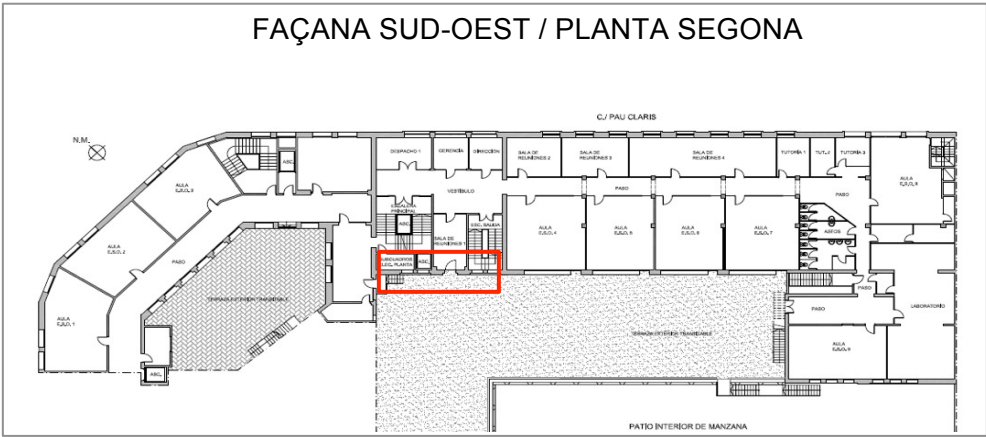


Figura 1.21: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 5:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	13,3 °C	16,9 °C	15 °C	0,93	14,2 °C	20 m	0,89m²/4,59
2	15,6 °C	17,5 °C	17 °C	0,93	14,2 °C	20 m	0,66m²/13,50
3	-	13,1 °C	-	0,79	14,2 °C	20 m	-
4	-	17,9 °C	-	0,93	14,2 °C	20 m	0,39m²/11,09
5	-	19,8 °C	-	0,93	14,2 °C	20 m	-
6	-	18,5 °C	-	-	14,2 °C	20 m	-
7	15,6 °C	17,3 °C	16,7 °C	0,93	14,2 °C	20 m	3,47 m
8	-	18,7 °C	-	0,93	14,2 °C	20 m	-
9	-	17,9 °C	-	0,93	14,2 °C	20 m	-
10	-	16,8 °C	-	-	14,2 °C	20 m	-
11	-	15,1 °C	-	0,93	14,2 °C	20 m	-

Aquest termograma ens presenta una imatge més àmplia de la façana Sud-Oest. Com podem observar en l'àrea 1, trobem una diferència de temperatura important de 3,6 °C. Existeix, per tant, una distribució irregular de temperatura, i és deguda a que hi ha humitat retinguda en la part superior de les finestres (llinda). A l'àrea 2, i amb els raigs infrarojos es poden distingir els maons de l'obra de fàbrica que conformen el sistema constructiu de la façana, i la distribució irregular de temperatura per la manca d'aïllament.

El punt 3, fa referència a tubs de gas de coure per aquest motiu es troben a baixa temperatura.

El punt 4 presenta un augment de temperatura a 17,9 °C. Entenem que es tracta d'un defecte constructiu, ja que coincideix amb el límit de l'entrant ornamental de la finestra de la planta quarta (veure figura 1.22).



Figura 1.22: Imatge ampliada de l'entrant ornamental de la finestra (Font: Elaboració pròpia)

El punt 5 i 9 ens mostra un augment considerable de temperatura a 17,9 °C i 19,8 °C. Es tracten de les llosanes dels balcons, que tal i com he citat anteriorment, són una via de sortida d'aire interior. El punt 6 i 10, fan referència a una finestra oberta, la qual deixa escapar aire interior, fet que disminueix el rendiment dels sistemes de calefacció. La línia 7 ens mostra la irregularitat de temperatures que existeix en la façana per la manca d'aïllament.

Aquest gràfic, representa la distribució de temperatures de la línia 1. Podem observar com comença amb 15,6 °C, en la part superior de la planta 4 i augmenta de temperatura, fins al terra de la planta 3. La part superior de la planta quarta, es troba a menys temperatura ja que el forjat superior està en contacte amb l'exterior, ja que conforma la coberta transitable de la planta quarta, i és una zona no calefactada, on es troba una zona de banys i la caixa d'escala de l'edifici.

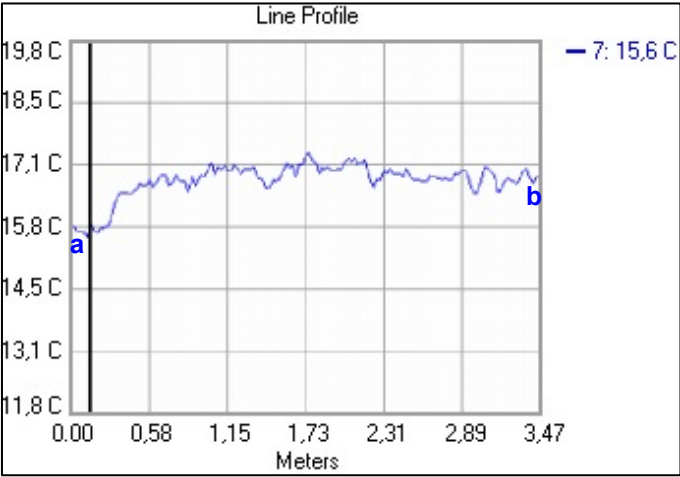


Figura 1.23: Gràfic comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

El punt 8 fa referència al calaix de persiana, per on es produeixen pèrdues de calor, per manca d'aïllament o per una incorrecta col·locació del mateix.

En el punt 11, observem una zona molt limitada on la temperatura disminueix notablement. Deduïm que anteriorment existia una obertura, ja que es pot detectar una llinda a menys temperatura, i si ens fixem detingudament, podem comprovar que la part inferior de la llinda també està a menys temperatura, com si es tractés d'un element constructiu (porta) tapiat.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels):

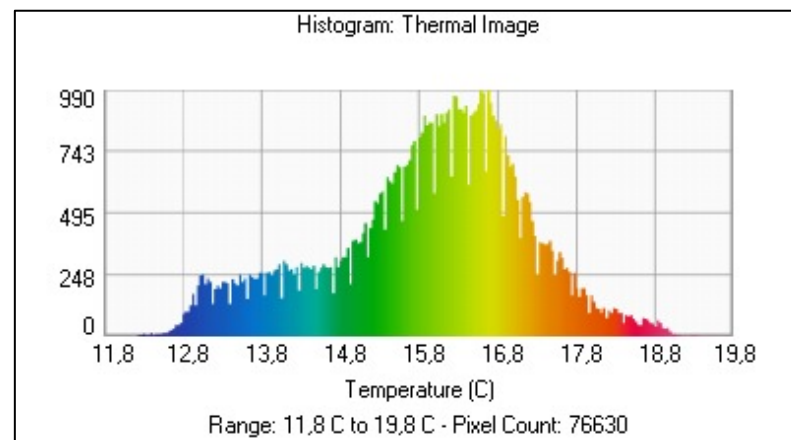


Figura 1.24: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

Seguidament es presenta una imatge en 3D, del termograma, o en es visualitzen amb claredat les diferents distribucions tèrmiques de la façana:

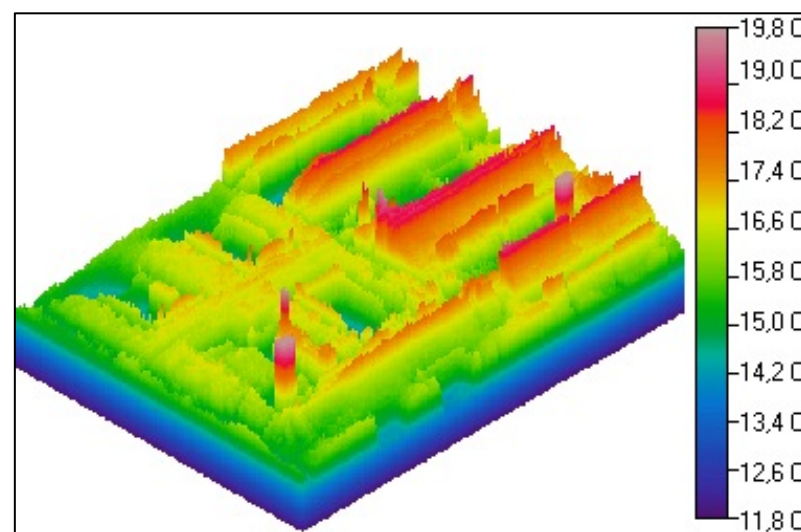
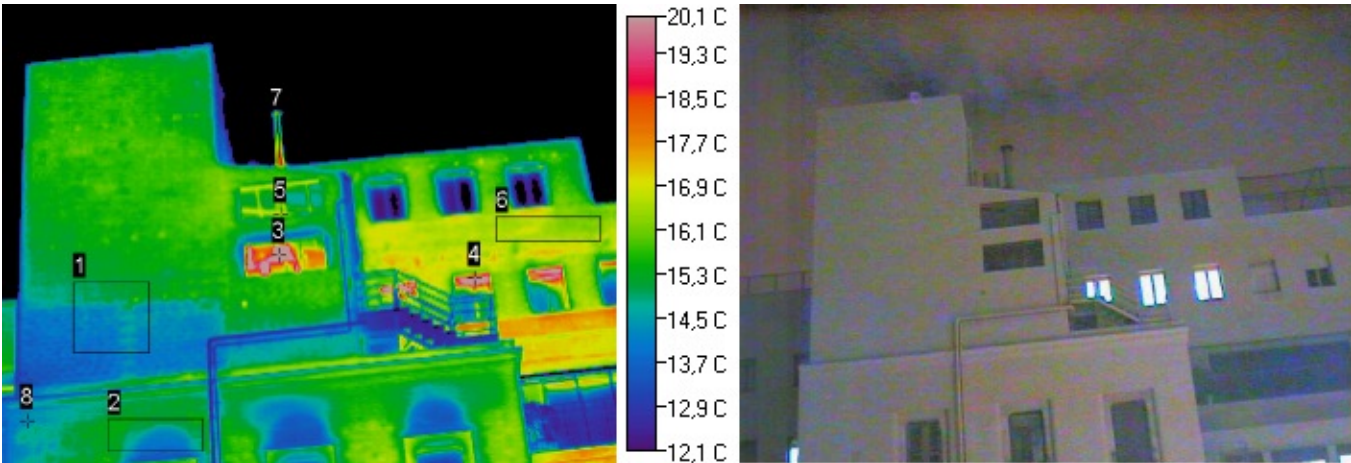
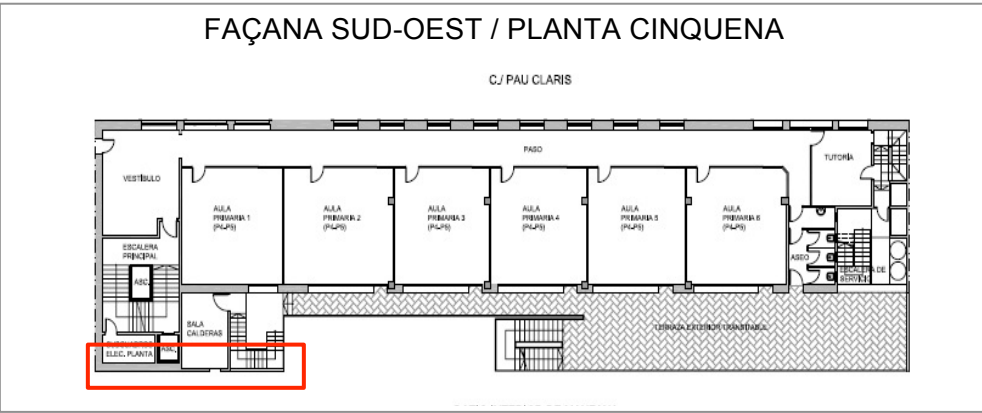


Figura 1.25: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 6:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	13,7 °C	16,2 °C	14,5 °C	0,93	14,2 °C	25 m	1,33m ² /2,66
2	13,7 °C	15,7 °C	14,8 °C	0,93	14,2 °C	25 m	0,76m ² /3,05
3	-	24,9 °C	-	0,94	14,2 °C	25 m	-
4	-	21,7 °C	-	0,93	14,2 °C	25 m	-
5	-	16,3 °C	-	0,94	14,2 °C	25 m	-
6	16,1 °C	17,3 °C	16,7 °C	0,93	14,2 °C	25 m	0,64m ² /12,29
7	15,4 °C	22 °C	18,7 °C	0,52	14,2 °C	25 m	0,81 m
8	-	14,4 °C	-	0,93	14,2 °C	25 m	-

En aquest termograma es pot observar com la façana esquerra es troba a una temperatura estable i no es generen pèrdues de calor. Això és degut a que es tracten de les caixes d'escaleres, banys i vestuaris de l'edifici, zones les quals no estan calefactades interiorment. També cal destacar que en el moment de la presa del termograma i hores abans, aquests zones no havien estat ocupades pels usuaris. Tot i

això si ens fixem detingudament en l'àrea 1 i en el punt 8, podem observar una zona més freda a 13,7 °C, (a 2,5 °C menys que la resta de la façana). Existeix, per tant, humitat per condensació en aquesta àrea de la façana, que correspon a la sala dels subquadres elèctrics de la planta, i al buit d'ascensor. Aquesta divergència de temperatura, és deguda a la problemàtica que genera arribar a una temperatura estable interior tant a l'hivern com, a l'estiu, el que provoca patologies d'humitat, en les zones més fredes interiorment, com en aquest cas, on la humitat s'ha creat just en el buit de l'ascensor i la sala de subquadres elèctrics.

L'àrea 2 com hem citat en el termograma anteriors, es tracta d'una zona de la façana amb humitat retinguda, ja que baixa la temperatura.

El punt 3 fa referència a la finestra de la sala de caldera, la qual es troba oberta i dissipa la calor generada per la caldera en funcionament cap a l'exterior. Cal remarcar, que segons els usuaris, la temperatura interior de la planta cinquena es deu a la combinació dels sistemes de calefacció encesos de la planta, així com de l'efecte xemeneia que crea la caixa d'escala i que provoca la pujada de temperatura de les plantes inferiors cap a la zona superior. Aquesta combinació, suposa una pujada de temperatura molt elevada, i es fa necessari obrir les finestres, per arribar a una temperatura interior estable.

El punt 4 ens mostra les pèrdues de calor per la caixa de persiana, degut a la manca d'aïllament de la mateixa.

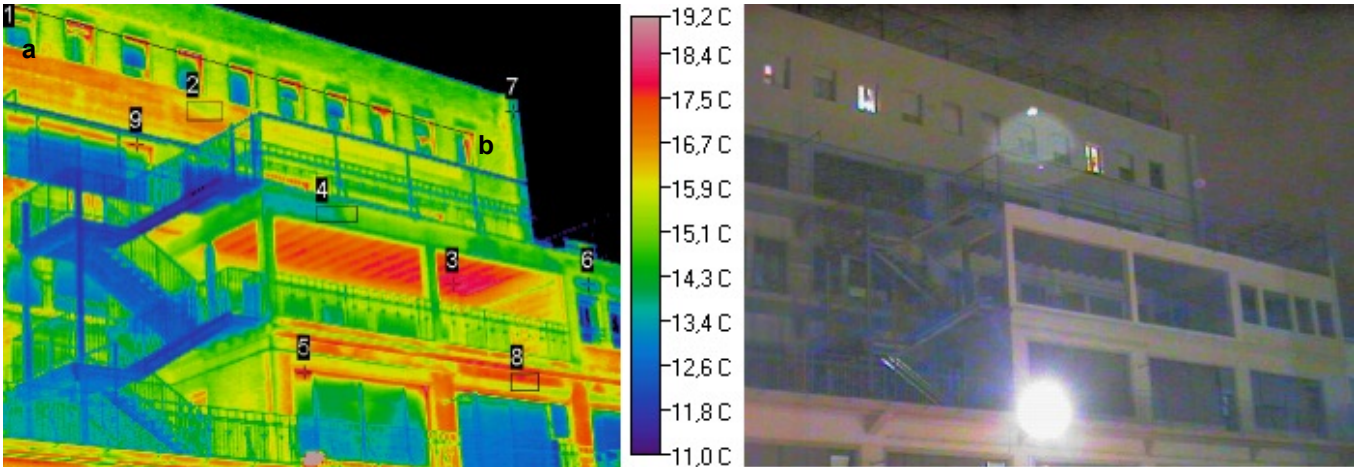
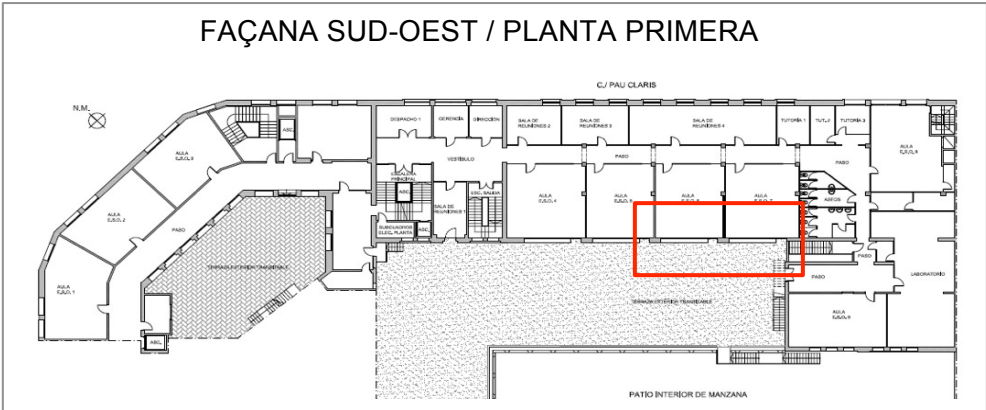
El punt 5, assenyala el marc de la finestra de la sala caldera, on es pot observar, que no es tracta del mateix disseny de la resta de marcs, i aquests no tenen trencament de pont tèrmic el que suposa una pèrdua lleugera de la temperatura interior.

El punt 6 ens assenyala una zona irregular de temperatura de la façana, la qual és deguda a l'absència d'aïllament en tot el perímetre del tancament.

El punt 7, fa esment d'una xemeneia la qual aporta càrrega tèrmica a l'exterior. Es pot observar que la part inferior es troba a una temperatura de 22 °C mentre que la part superior es troba a 15,4 °C, ja que no es troba en funcionament al 100%, sinó que per l'horari de la presa del termograma el funcionament de la xemeneia estava finalitzant

TERMOGRAMA 7:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	14,5 °C	19,2 °C	16,4 °C	-	14,2 °C	25 m	7,22 m
2	15,6 °C	17 °C	16,2 °C	0,93	14,2 °C	25 m	0,17m²/2,66
3	-	18,1 °C	-	0,93	14,2 °C	25 m	-
4	13,3 °C	15,6 °C	14,4 °C	0,93	14,2 °C	25 m	0,16m²/0,18
5	-	18,4 °C	-	0,94	14,2 °C	25 m	-
6	-	13,1 °C	-	0,93	14,2 °C	25 m	0,64m²/12,29
7	-	13,7 °C	-	0,93	14,2 °C	25 m	0,81 m
8	15,8 °C	18,2 °C	17 °C	0,93	14,2 °C	25 m	0,12m²/2,74
9	-	17,5 °C	-	0,93	14,2 °C	25 m	-

L'àrea del punt 2, ens mostra una petita part de la façana que es troba a una temperatura inferior a la resta, exactament 15,6 °C. Això és degut a que existeix humitat retinguda en aquest punt del parament.

En la línia 1 es pot observar clarament les pèrdues energètiques que es produeixen per les caixes de persianes de les finestres. Aquest fet, és degut a la manca d'aïllament, o a la ineficient col·locació del mateix. A continuació s'exposa el gràfic de la línia 1, el qual ens facilita de forma visual, les pujades de temperatura que es produeixen coincidint amb les caixes de persiana de les finestres:

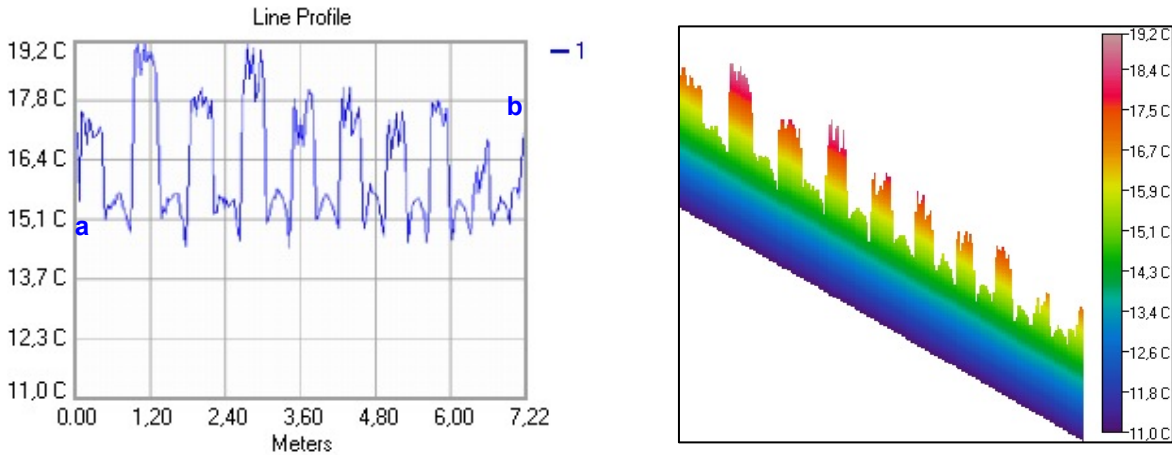


Figura 1.26: Gràfic i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

El punt 3, ens indica el sostre format per bigues de fusta i voltes de maó, el qual es troba a una temperatura molt elevada, i que hem citat anteriorment.

L'àrea 4 i el punt 6 i 7, ens assenyalen diferents parts de la façana on hi ha condensació, i es troben a menys temperatura, que la resta de façana.

El punt 5 i 9 ens mostren novament, la manca d'aïllament en les caixes de persianes de les finestres, i per tant les pèrdues energètiques que es produeixen. No podem analitzar la temperatura del vidre de la finestra del punt 5, ja que la mesura es veu afectada pel fanal que es troba encès del pati interior.

El punt 8, ens indica el cantell del forjat per on existeixen ponts tèrmics discontinus, que demostren la irregularitat en l'execució del forjat. Aquest efecte es veu clarament en aquesta aula, la qual ha estat ocupada durant totes les hores al dia.

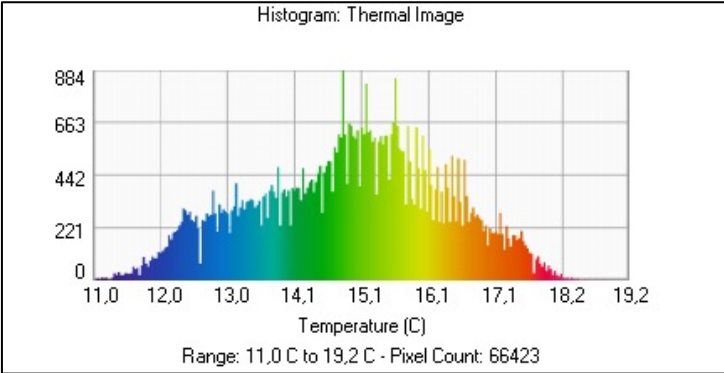
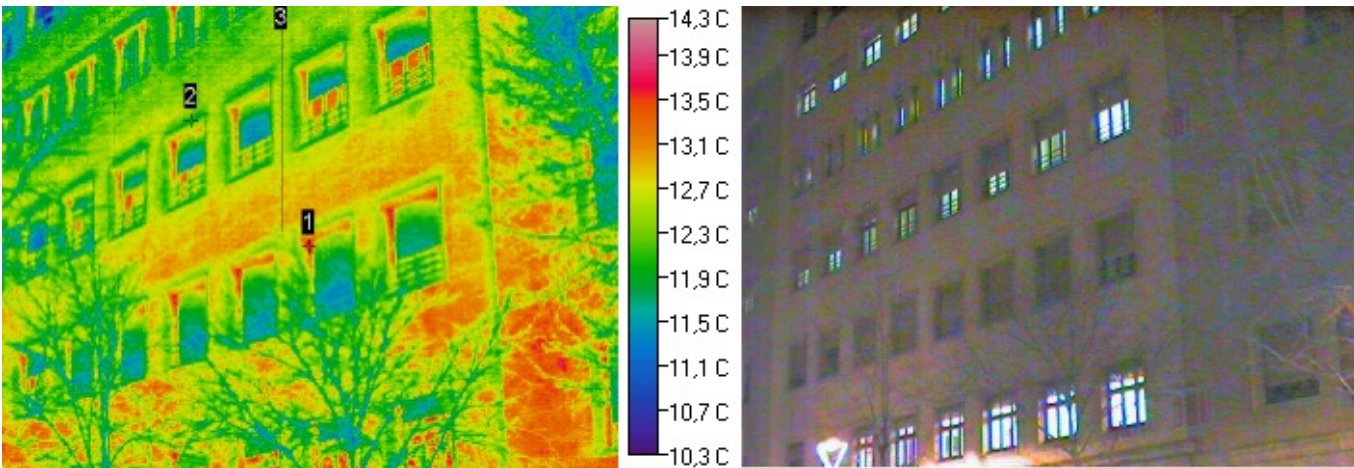
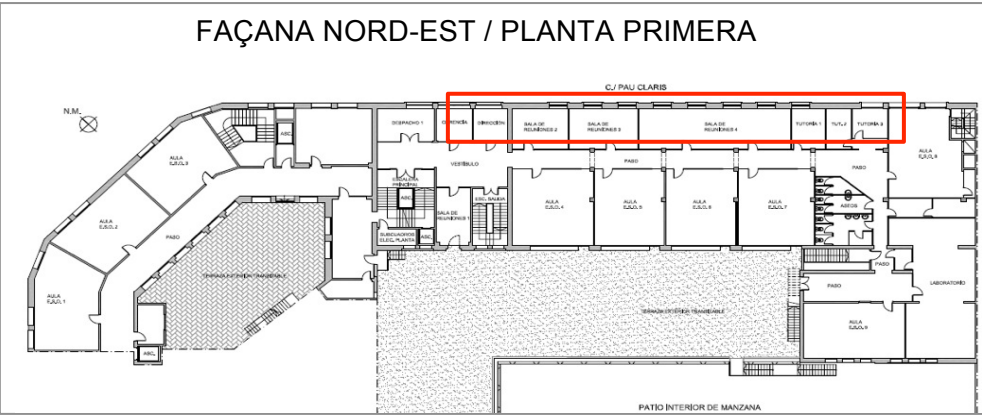


Figura 1.27: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 8:

- Ubicació:



Línia/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	-	13,7 °C	-	0,93	12,5 °C	20 m	-
2	-	11,9 °C	-	0,93	12,5 °C	20 m	-
3	12,3 °C	13 °C	12,6 °C	0,93	12,5 °C	20 m	2,68 m

Ens situem en el Carrer Pau Claris, per analitzar tèrmicament la façana Nord-Est. Observem que el punt 1 té una temperatura més elevada que la resta de la façana, exactament de 13,7 °C. Aquest augment de temperatura, és degut a que la fusteria d'aquesta façana de fusta massissa, no està dissenyada contra el trencament de pont tèrmic, i per tant, es produeixen pèrdues d'energia. El punt 2, ens marca una zona on la temperatura disminueix, i per tant on hi ha acumulació d'humitat, coincidint amb la zona superior de les caixes de persiana. Aquest fet, es produeix per una manca i uniformitat de l'aïllament per tot el tancament vertical. En referència a la línia 3, s'ha volgut comprovar el procés de canvi de temperatura que existeix entre una planta i l'altre. Es poden observar, els radiadors que es troben en funcionament i els que no estan encesos de la planta superior, i on la temperatura disminueix conseqüentment. Cal remarcar que les plantes inferiors es troben a més temperatura ja que

comuniquen amb les aules, despatxos i sales de reunions, estàncies les quals han estat ocupades recentment i amb el sistema de calefacció encès. A diferència de les plantes superiors, on podem observar que la temperatura disminueix, ja que comuniquen amb una zona de pas (passadís de l'escola). La zona dreta inferior de la imatge, on observem un augment important de temperatura, correspon a l'aula d'informàtica, on la temperatura interior és molt elevada, i es reflecteix en la façana, per on es produeixen dissipacions energètiques per la manca d'aïllament.

En referència als vidres de les finestres d'aquesta façana, cal destacar que es tracten de vidres simples de 3 mm de gruix, on es poden generar ponts tèrmics importants, però que en aquesta imatge no podem avaluar correctament, ja que existeixen reflexes interiors i exteriors, que dificulten els resultats.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D, del termograma:

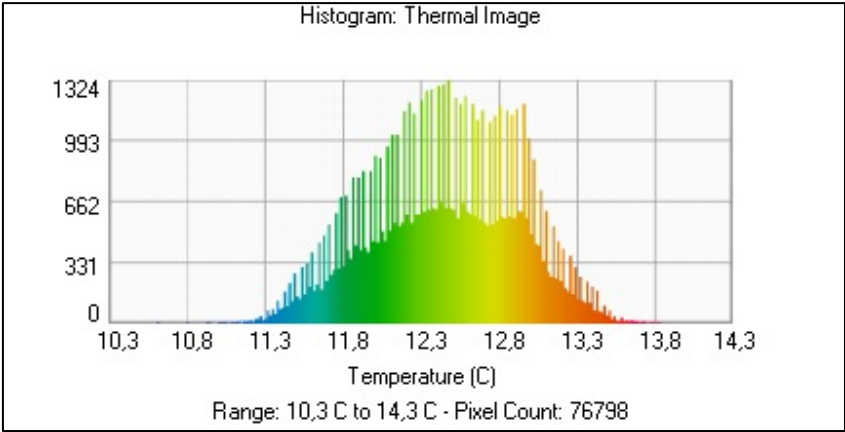


Figura 1.28: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

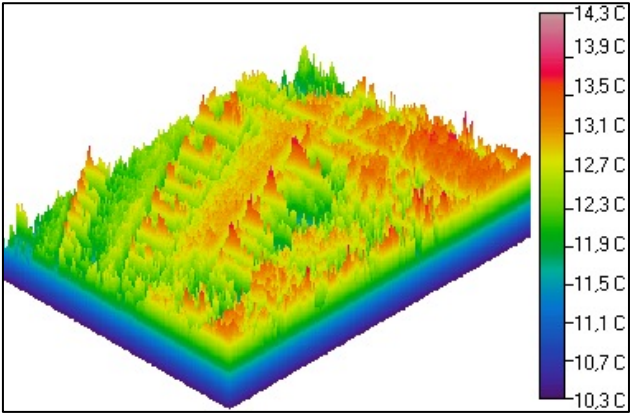
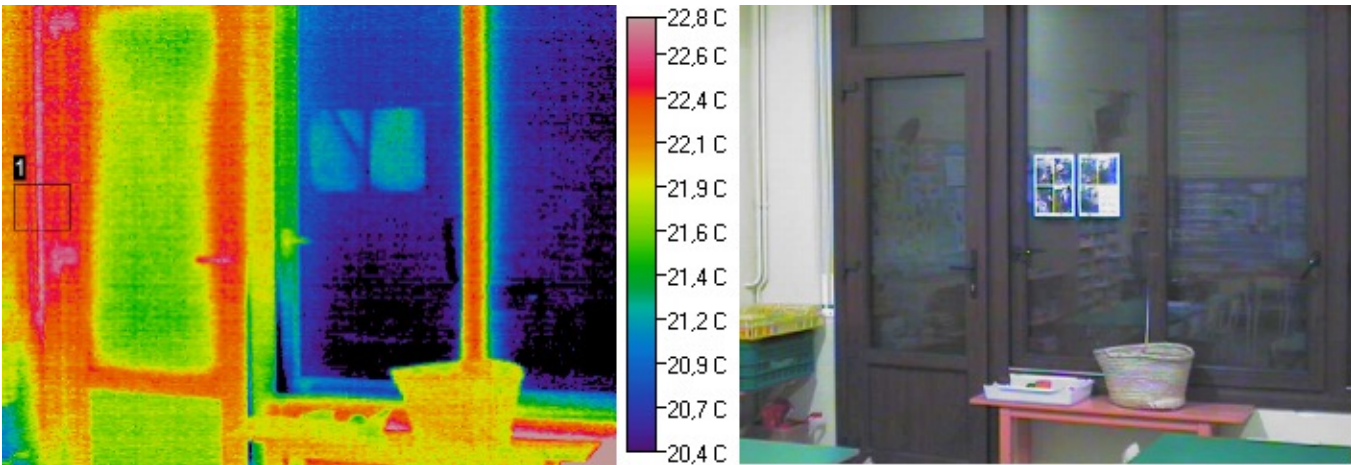
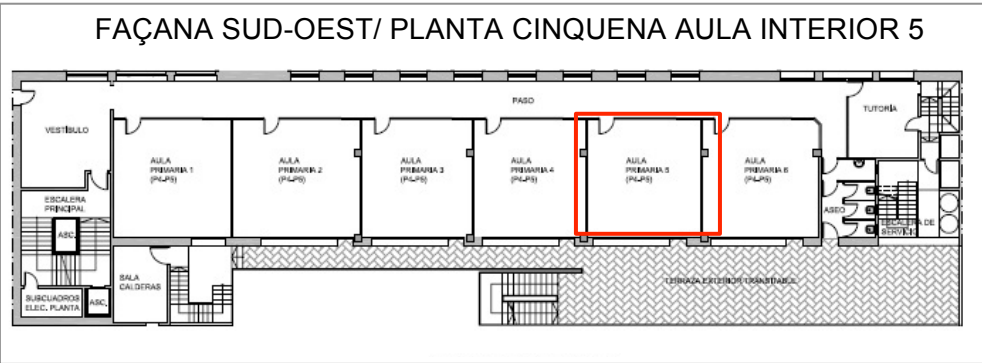


Figura 1.29: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

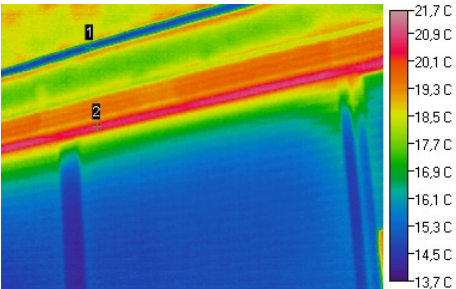
TERMOGRAMA 9:

- Ubicació:



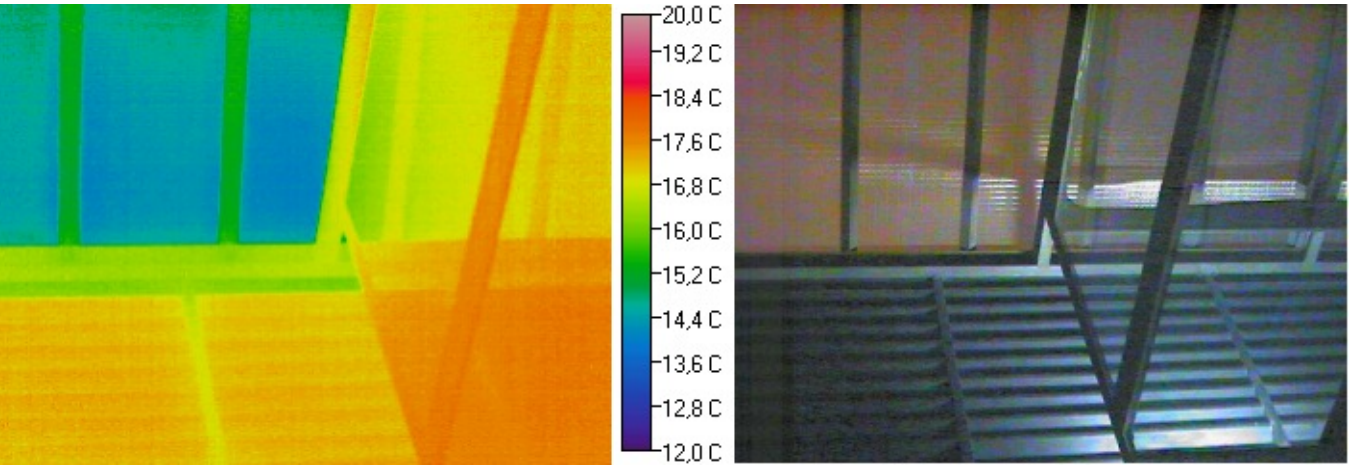
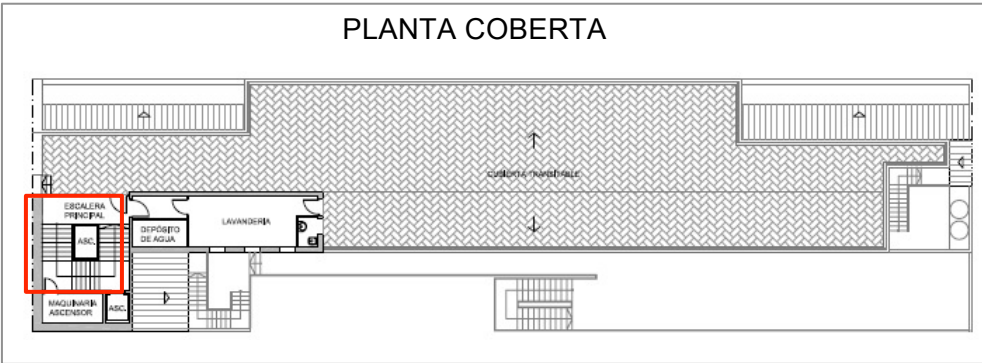
Àrea	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	22,1 °C	23,4 °C	22,6 °C	0,64	22,1 °C	3 m	0,01m²/0,04

Aquest termograma s'ha pres des de l'interior de l'edifici, en una aula la qual havia estat ocupada durant tot el dia i amb el sistema de calefacció encès. Aquesta façana correspon a la façana Sud-Oest, la qual hem analitzat anteriorment però per la part exterior. El que es pretén amb aquesta imatge infraroja és comprovar l'eficiència d'una fusteria amb trencament de pont tèrmic. Si ens fixem en la temperatura de la fusteria, aquesta es troba a 22 °C aproximadament, mentre que si la comparem amb la imatge infraroja exterior (veure figura dreta), la fusteria es troba a baixa temperatura, el que comporta que no es produeixin pèrdues energètiques pel marc de les finestres. L'àrea 1 ens mostra la temperatura elevada del tub de calefacció, la qual es troba en funcionament.



TERMOGRAMA 10:

- Ubicació:



Aquesta imatge infraroja s'ha pres des de l'interior de l'edifici, enfocant la claraboia que conforma el sostre de la caixa d'escala principal de l'edifici. No podem treballar amb les mesures obtingudes del vidre de la claraboia, ja que els reflexes interiors i exteriors distorsionen el resultat final.

Tot i això, la finalitat d'aquest termograma es analitzar la reixa que limita amb la part de vidre. Cal mencionar que es tracta d'unes reixes de ventilació, que es troben en contacte amb l'exterior, i que conseqüentment deixen escapar l'aire calent interior (motiu pel qual es troben a més temperatura). Les dimensions d'aquests reixes suposen pèrdues d'energia importants, i per tant ocasionen una demanda energètica superior a la necessària per l'edifici.

L'efecte xemeneia citat anteriorment, arriba fins a aquest sostre, on la temperatura elevada composta per l'acumulació d'energia calorífica de totes les plantes inferiors es dissipa cap a l'exterior.

1.2.5 PROPOSTES D'ACTUACIÓ:

Un cop analitzades les imatges termogràfiques de l'edifici, es considera convenient treballar sobre mesures d'actuació, que es podrien duu a terme per millorar el comportament tèrmic de l'immoble.

En primer lloc, cal afirmar que l'usuari juga un paper molt important, i el comportament eficient d'aquest, és imprescindible per començar a treballar en temes d'eficiència energètica. El fet de tenir exfiltracions d'aire calent, per una finestra oberta (amb el sistema de calefacció interior en funcionament), només es soluciona millorant la conducta i consciència de l'usuari.

En relació amb els problemes constructius que pateix l'edifici, i conseqüentment tèrmics, que hem pogut visualitzar amb la tècnica de la Termografia, i provoquen desconfort als usuaris, s'exposen les següents actuacions:

- Per solucionar els problemes d'aïllament de les façanes, es suggereixen dos opcions: es pot optar per la col·locació d'aïllament tèrmic, ja sigui sintètic o orgànic vers tot el parament. L'objectiu és definir el gruix mínim d'aïllament tèrmic que cal incorporar a les façanes per complir amb els requisits de la normativa vigent, en funció de la secció constructiva inicial i del material aïllant a considerar. Com estem treballant sobre un edifici de Construcció Tradicional, cal deixar clar que no és possible la instal·lació de l'aïllament per l'exterior de la façana (tot i que és el mètode amb el qual s'aconsegueixen més prestacions de confort i d'eliminació de ponts tèrmics), degut a que es modificaria l'aspecte final de la mateixa, i es tracta d'un edifici protegit, ja que forma part del patrimoni arquitectònic de la ciutat. L'únic sistema viable és la col·locació d'aquest per la part interior de l'immoble, essent conscients de la reducció d'espai que comporta aquesta solució. La segona opció que es presenta, i que és contrària a la primera solució exposada, és evitar aquesta tendència a cobrir tot el parament amb aïllament (que es tracta d'una proposta complicada en els edificis de l'Eixample), i centrar-nos en treballar en solucions més específiques i que poden comportar resultats més precisos i econòmics, com en el cas de la façana Sud-Oest, on es creu convenient la col·locació d'una segona motllura en la cornisa que augmenti el gruix de la mateixa, i que pot arribar a complir els requisits de transmissió tèrmica segons normativa, i evitar aquest pont tèrmic d'una manera més viable i econòmica, sense haver de revestir tot el parament amb aïllament.
- Per pal·liar les pèrdues energètiques de les obertures i els vidres de la façana Nord i Nord-Est, les mesures aplicables seran la substitució dels elements per fusteries d'alumini de baixa emissivitat Low-E i vidres amb doble càmera. Si no es vol trencar amb l'estètica de la façana, es pot optar per col·locar fusteria de fusta de major emissivitat com les de faig.

- En referència a les caixes de persiana, comprovar que existeix aïllament tèrmic, i en cas afirmatiu, verificar si existeix desgast del mateix, o bàsicament no presenten aquesta prestació.
- Implementació de proteccions solars en la façana Sud-Oest, que ajudin a regular els raigs Solars tant a l'hivern com a l'estiu.
- Sectorització d'escaleres per evitar l'efecte xemeneia, o evitar tenir la calefacció en funcionament de les plantes superiors, per evitar la pujada de temperatura i la solució sigui obrir les finestres per equilibrar la temperatura.
- Realitzar un manteniment correctiu i preventiu constantment, per garantir el confort de l'usuari, així com comprometre's en col·laborar amb el medi ambient, reduint les emissions de CO₂, i els elevats costos de les energies.

1.2.6 CONCLUSIONS:

La gran majoria dels edificis construïts abans del 1979, presenten problemes tèrmics en la seva envolupant, provocant un desconfort als ocupants, degut a problemes d'escalfament a l'hivern, i sobreescalfament a l'estiu, produint zones amb humitats i irregularitats de temperatura en les façanes.

Amb l'anàlisi d'aquest edifici, ens hem trobat amb aquests problemes esmentats: manca d'aïllament en totes les façanes de l'escola, tal i com indica la memòria constructiva del projecte, ja que es tracta d'un edifici construït a l'any 1941, i en aquesta època no existia normativa que regulés aquest tema. Fusteria, on identifiquem pèrdues energètiques pels perfils de les finestres de la façana Nord-est, la qual no està dissenyada contra trencament de pont tèrmic, segons projecte (la fusteria de la façana Sud-Oest, té trencament de pont tèrmic i per tant no es produeixen dissipacions energètiques). Caixes de persiana que no es troben aïllades, o que aquest és deficient, i conseqüentment són una via de sortida d'aire interior cap a l'exterior. Irregularitat en l'execució dels forjats de l'edifici.

Per finalitzar, es vol informar que en aquesta avaluació energètica, l'ús de la termografia ha demostrat ser imprescindible, no només per aportar dades reals, a partir de les quals podem realitzar càlculs energètics que són necessaris en un informe i extreure conclusions, sinó, per ajudar a comprendre de forma visual, els problemes energètics que presenta l'edifici als seus usuaris.

(Inspecció i informe termogràfic de façanes segons les directrius de la Norma Europea EN 13187:1999)

1.3 ANÀLISI TERMOGRÀFIC COL·LEGI CEIP DOCTOR FERRAN I CLUA

En aquest anàlisi termogràfic, es pretén avaluar la situació actual del tancament de façana de l'escola Doctor Ferran i Clúa, comprovant el seu estat i localitzant mitjançant les variacions de temperatura de la superfície, possibles pèrdues de calor o fred degut a defectes en l'aïllament o acumulació d'humitats, detectant qualsevol anomalia tèrmica provocada per un incorrecte gruix de l'aïllament per desgast o per absència del mateix, o qualsevol deficiència estructural o constructiva, d'aquest edifici construït fa 30 anys.

1.3.1 INTRODUCCIÓ

L'edifici objecte d'estudi, fa referència a un edifici escolar construït l'any 1982, que es troba ubicat a Barcelona, en la confluència entre el carrer Garcilaso 204 i el carrer Manigua 25-39. La façana del carrer Garcilaso està orientada al Sud, la façana del carrer Manigua està orientada a l'Est, la façana corresponent al Passatge Salvador Riera es troba orientada a Nord, i la façana orientada al carrer de les Acàcies es troba orientada a l'Oest.

L'edifici ocupa en la seva totalitat una superfície construïda de 1675,08 m², essent les dimensions de l'edifici de 19,8 x 84,6 m.

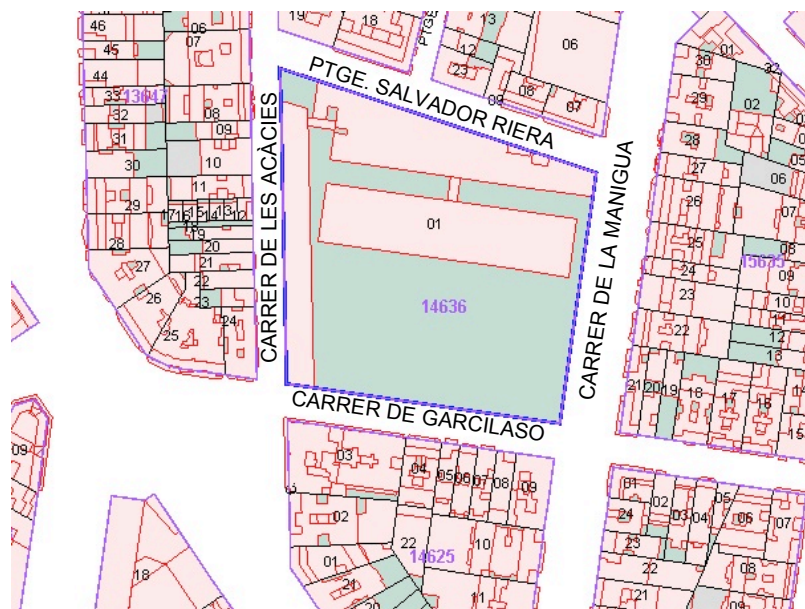


Figura 1.30: Plànol de situació de l'edifici Doctor Ferran i Clúa (Font: Sede Catastro)

1.3.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DE L'EDIFICI

L'edifici es compon de Planta Baixa, planta primera i planta coberta, a més d'un semi-soterrani (sense contacte amb el terreny) que ocupa mitja planta a nivell de la cota més baixa del terreny. La planta baixa es situa en la cota +98,80. A la planta coberta existeixen 2 pistes esportives.

L'estructura de l'edifici està realitzada amb formigó armat, amb forjats unidireccionals i pilars de 30x30 en el perímetre, i circulars en l'interior de l'edifici, amb secció constant en totes les plantes, però convertint-se en quadrats en la trobada amb la fonamentació. Aquests pilars formen un retícula cada 4 m longitudinalment, i 6,4 m transversalment.

La façana està formada per una fulla exterior de fabrica de maó de 14 cm de gruix, una càmera d'aire, una planxa de poliestirè de 4 cm i una fulla interior ceràmica de 7 cm de gruix, amb acabat de guix. La planta semi-soterrani disposa d'un aplacat de pedra artificial col·locat amb morter.

La fusteria exterior és d'alumini anoditzat, amb dues fulles. Els perfils no tenen trencament de pont tèrmic, i els vidres són senzills de 4 mm de gruix, sense acabat o tractament superficial.

1.3.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI

1.3.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI:





Figura 1.31: Imatges de les diferents façanes de l'edifici i de la planta coberta (Font: Elaboració pròpia)

1.3.3.2 PLÀNOLS DE L'EDIFICI:

PLANTA SEMI-SOTERRANI

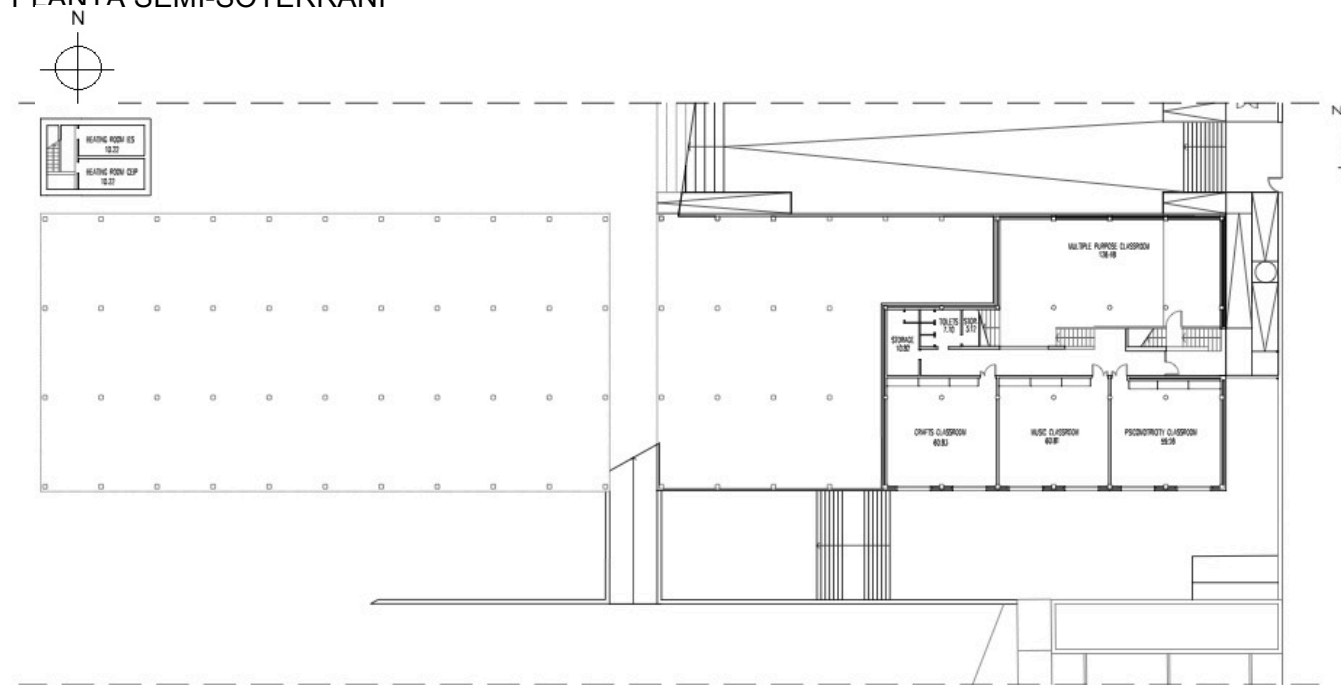


Figura 1.32: Plànol Planta Semi-soterrani

PLANTA BAIXA

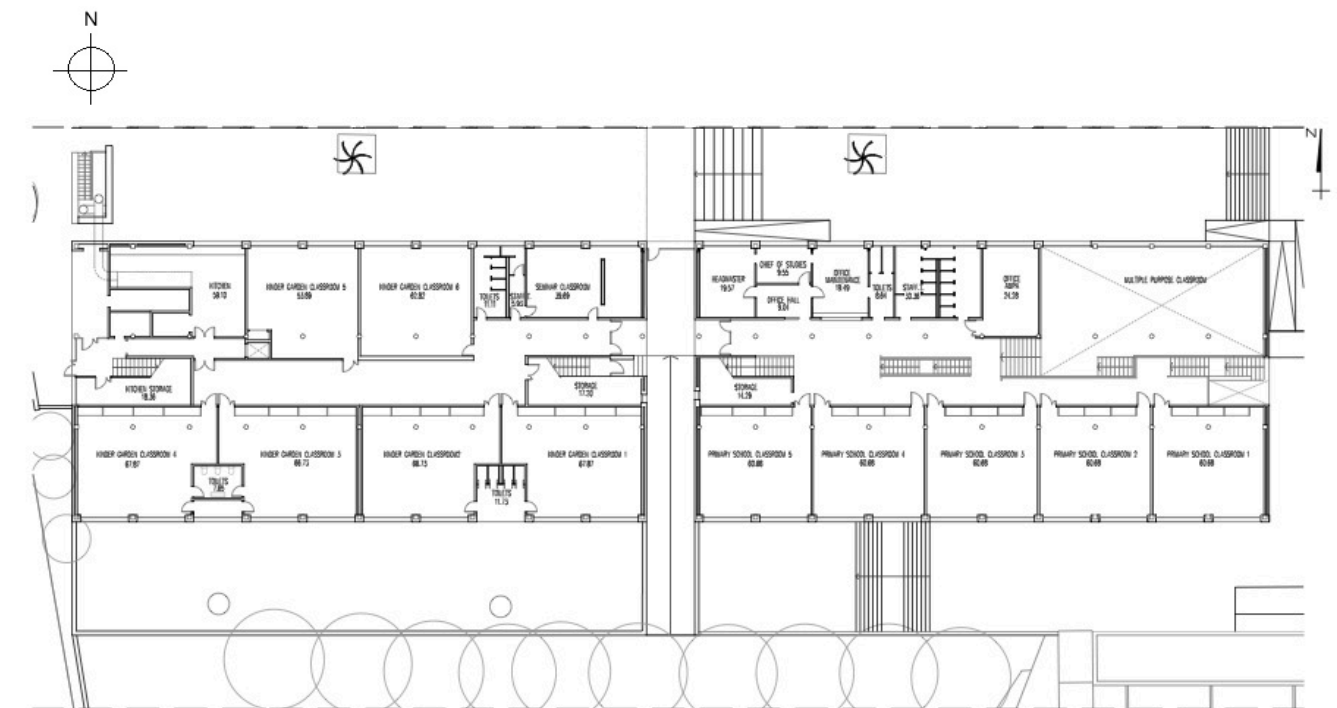


Figura 1.33: Plànol Planta Baixa

PLANTA PRIMERA

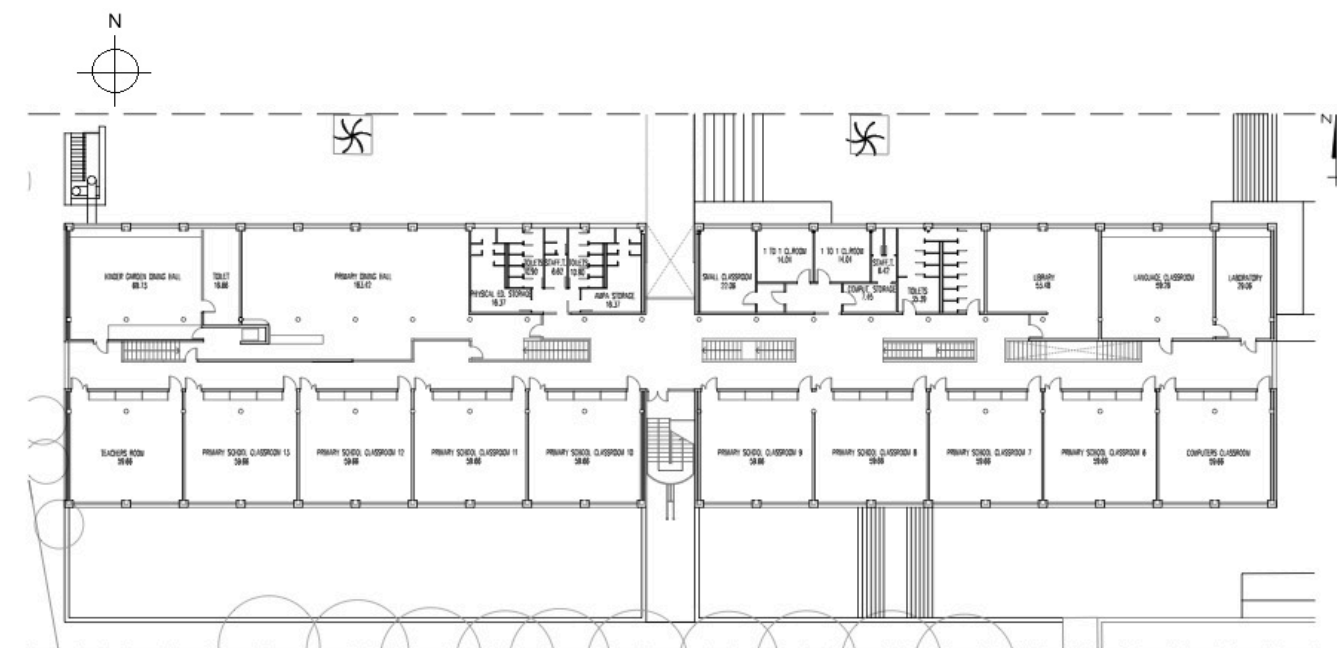


Figura 1.34: Plànol Planta Primera

1.3.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS

L'avaluació energètica que s'ha realitzat en aquesta Escola, ha servit per determinar la necessitat d'implementar diverses actuacions en l'edifici, amb la finalitat de reduir les pèrdues energètiques que pateixen les aules de l'escola. La majoria d'aquestes pèrdues energètiques són fruit de una incorrecta posta en obra dels sistemes constructius.

Per duu a terme aquest estudi energètic, s'han utilitzat diferents equips de mesura, tals com: un luxòmetre i diferents higròmetres, que han servit per analitzar diferents variables.

Posteriorment amb aquest projecte s'ha complementat lavaluació amb l'ús d'una càmera termogràfica, la qual ens ha aportat dades numèriques, i imatges reals de la situació de l'edifici. Fet que ajuda a entendre amb facilitat l'estat de l'edifici, i és una mesura que pot ajudar a fer comprendre als usuaris la necessitat de realitzar canvis.

Les dades de la inspecció termogràfica s'han recollit amb una fitxa de recollida de dades, que s'exposa a continuació

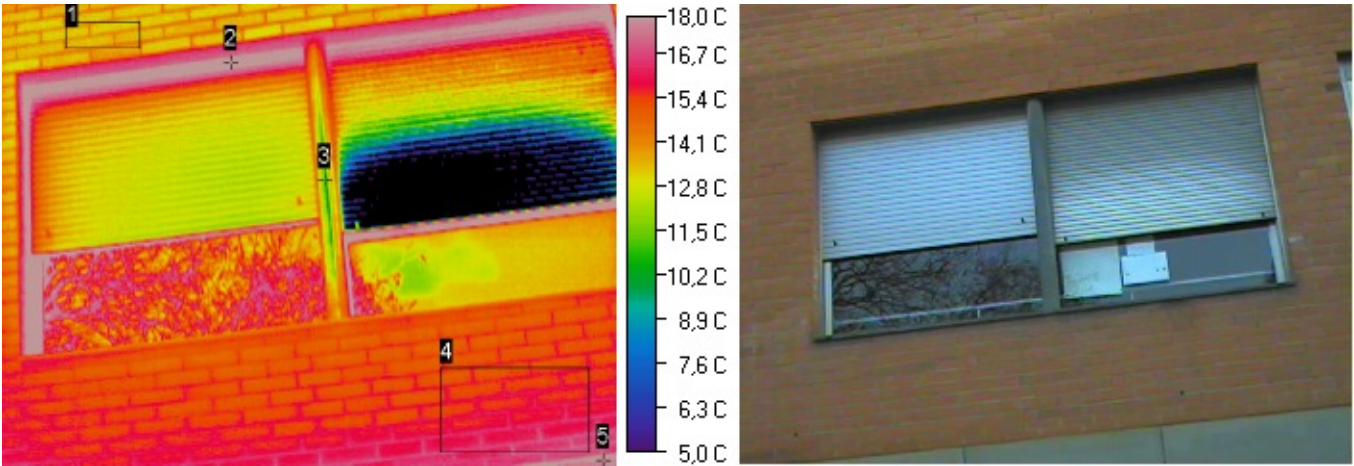
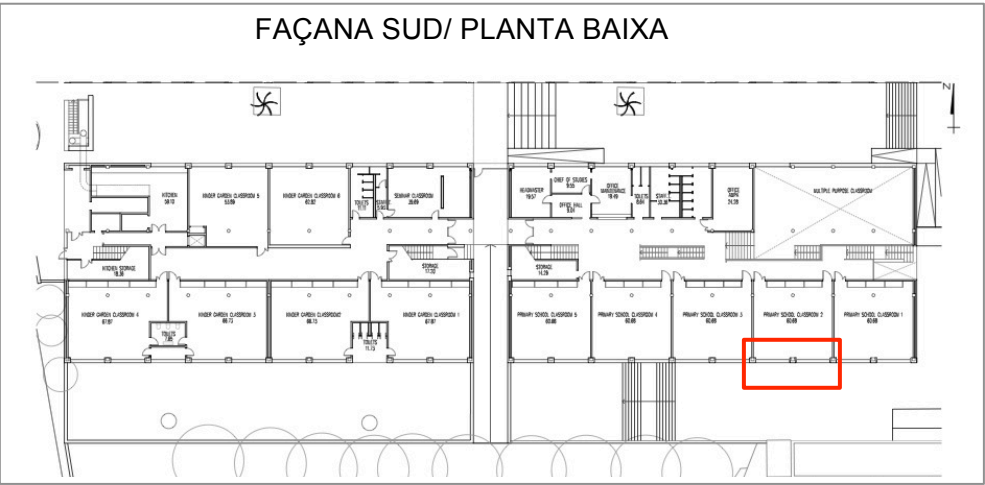
Localitat	Adreça	Nº	Vent: Direcció i velocitat	Orientació	Dia/mes/any	Hora Inici anàlisi	Estat del cel	Temp. Exterior	H % Exterior	Hora fi anàlisi
Barcelona	C/ Garcilaso	204	31 km/h	Altitud 126	30 / 03 / 2012	08,25 h	No ennuvolat, assolellat	16 °C	63 %	09,30 h

Nº Presa	Ubicació	Distància presa del termograma	Tº Exterior	Tº exterior 24 hores abans	Tº Interior	Tº Superficial	H % Exterior	H% interior	Observacions
TH910179 TH910180 TH910181 TH91082	Façana Nord (zona superior)	11 m	16,2 °C	12,4 °C	23,1 °C	16,4 °C	63 %	-	Existència de 2 palmeres que provoquen ombra a la façana Nord. Trobem humitat a la zona inferior de la façana.
TH910184	Façana Nord (zona inferior, revestiment de maó)	6 m	15,9 °C	12,4 °C	23,3 °C	16,4 °C	62,5 %	-	Nivell inferior de la Façana Nord, on es troben diferents materials de revestiments, i dels quals s'extreuen les dades de superfície de contacte dels dos tipus de revestiments.
TH910183	Façana Nord (zona inferior, revestiment de pedra)	9 m	15,8 °C	12,4 °C	23,3 °C	16,6 °C	62,5 %	-	
TH910177	Façana Sud (zona inferior)	7,50 m	16,3 °C	13,3 °C	22,1 °C	17,1 °C (zona formigó)	57,5 %	-	Inexistència d'edificis veïns que provoquin ombra, però existència d'arbres que provoquen ombra a la façana Sud. Existència d'humitats
TH910173 TH910175 TH910176 TH910178	Façana Sud (zona superior, revestiment maó)	16 m	15,7 °C	13,3 °C	22,1 °C	16,1 °C	56,3 %	-	Podem observar que les finestres de Planta Baixa tenen proteccions solars, amb lamel·les orientables.
TH910186	Aula interior, llindant amb façana Sud	6,60 m	16,3 °C	13,3 °C	22,1 °C	22,3 °C (paret interior aula)	56,3 %	-	S'analitza una aula de façana Sud, diferenciant les temperatures de contacte, entre pilar i paret de façana.
TH910186	Aula interior, llindant amb façana Sud	6,60 m	16,3 °C	13,3 °C	22,1 °C	23,1 °C (pilar)	56,3 %	-	
TH910189	Aula interior, llindant amb façana Nord	6,20 m	15,9 °C	13,3 °C	24,4 °C	25 °C	62,5 %	-	S'analitza una aula de façana Nord, on la temperatura interior és més elevada, i s'han de protegir dels raigs solars amb proteccions exteriors (persianes).
TH910190	Zona menjador interior	6,60 m	16,2 °C	13,4 °C	24,9 °C	25,3 °C	62,5 %	-	Zona interior on s'observa que la temperatura interior és la més elevada.

Taula 1.35: Fitxa de recollida de dades (Font: Elaboració pròpia, i Meteoclimatic.)

TERMOGRAMA 1:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	12,8°C	14,7 °C	13,5 °C	0,93	16,3 °C	7,5 m	0,04 m ² /1
2	-	20,1 °C	-	0,52	16,3 °C	7,5 m	-
3	-	5,4 °C	-	0,56	16,3 °C	7,5 m	-
4	14,8°C	17,6 °C	16 °C	0,93	16,3 °C	7,5 m	0,26 m ² /0,57
5	-	17,9 °C	-	0,93	16,3 °C	7,5 m	-

En aquest termograma es poden visualitzar clarament les pèrdues energètiques que es produeixen per les juntes de morter que conformen la fàbrica de maó (punt 1).

També observem que la fusteria no està dissenyada contra trencament de pont tèrmic, i suposa una via de sortida d'aire calent interior cap a l'exterior. El punt 2, es troba a una temperatura de 20,1 °C, es tracta de la llinda metàl·lica de la finestra, i de la caixa de persiana, la qual no es troba aïllada

tèrmicament. La llinda metàl·lica és un bon conductor de calor, i per aquest motiu es troba a una temperatura elevada, ja que acumula la calor que prové de les pèrdues energètiques, que es produeixen per la fusteria i la caixa de persiana.

En referència al punt 3, es tracta del pilar central metàl·lic que separa les finestres, i el qual es troba a una temperatura més baixa, ja que es tracta d'un element aïllat de la façana.

L'àrea 4, ens mostra una pujada de temperatura en l'ampit de la finestra. Es tracta d'una aula en la qual els sistemes de calefacció (radiadors) estaven encesos en el moment de la presa del termograma. Amb aquest fet, hem pogut observar que la zona inferior de les finestres, on estan col·locats els radiadors per la part interior, existeix un augment de temperatura en la façana, el que suposa pèrdues de calor importants. Aquestes diferències de temperatura es deuen a que existeixen irregularitats en l'aïllament que compona la façana de tota l'Escola. El punt 5, el qual ens indica el forjat inferior de la planta baixa, es troba a una temperatura elevada, el que significa un pont tèrmic important per la manca d'aïllament en el cantell del forjat. També es pot comprovar que es tracten de dos materials diferents.

En relació als vidres, no podem extreure una conclusió fiable, ja que existeixen reflexions exteriors dels arbres, i reflexions interiors de les aules, les quals ens modifiquen la temperatura correcta dels mateixos. Aquesta reflexió, ve donada també per l'angle en el qual s'ha pres la fotografia infraroja.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D, del termograma:

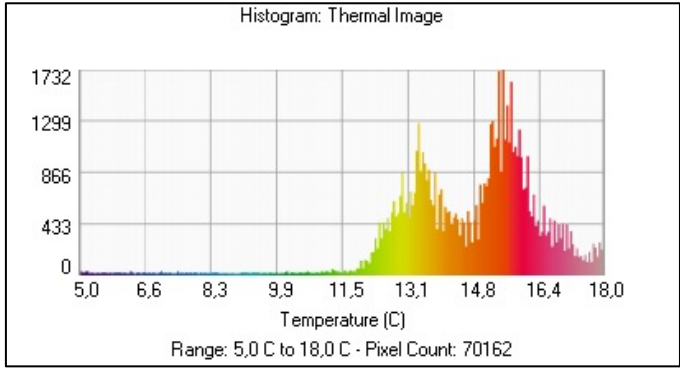


Figura 1.36: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

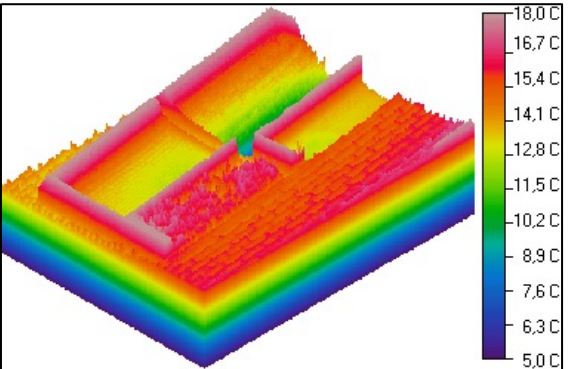
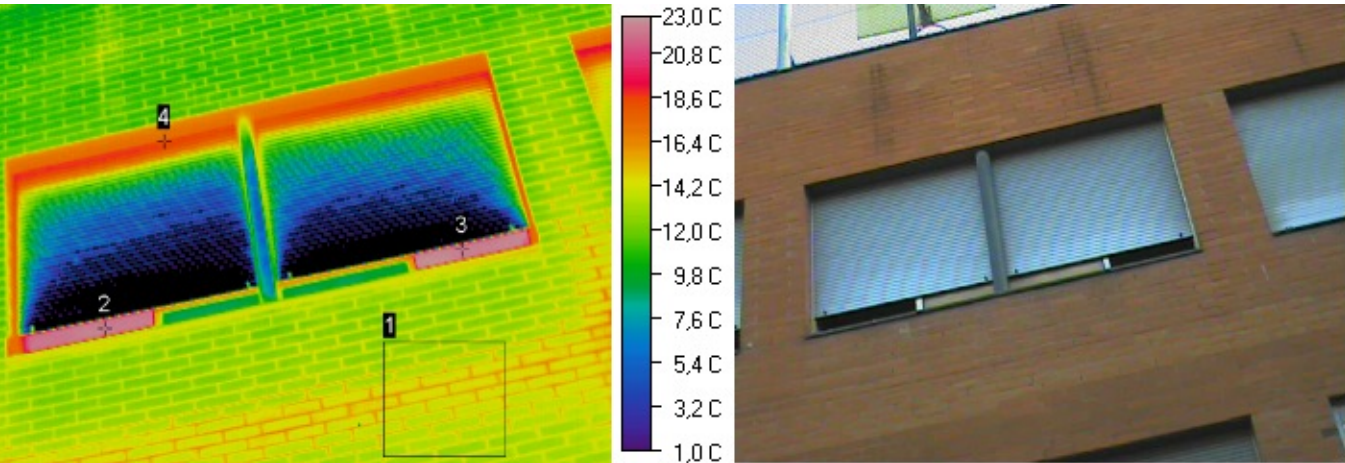
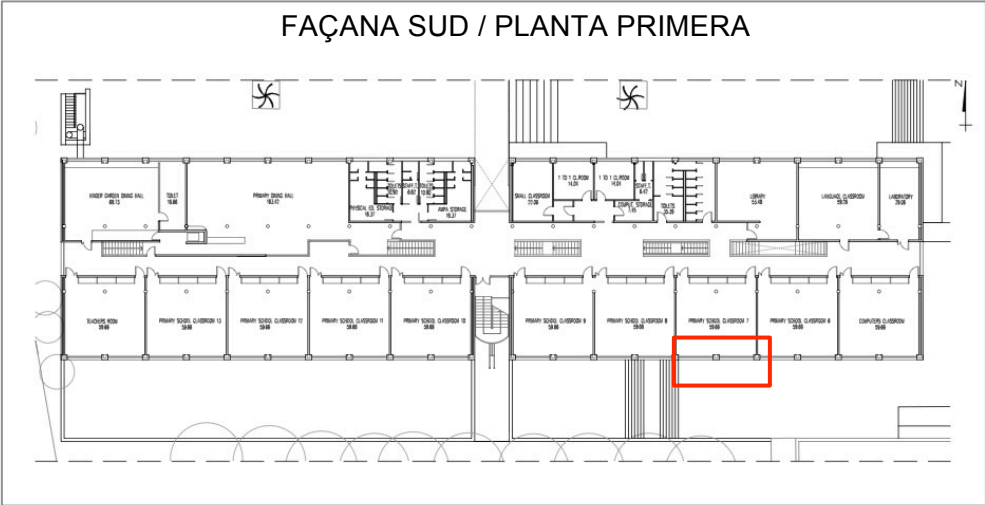


Figura 1.37: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 2:

- Ubicació:



Àrea/Punt	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	12,3 °C	16,5 °C	14,1 °C	0,93	15,7 °C	16 m	1,41m²/15,52
2	-	22,5 °C	-	-	15,7 °C	16 m	-
3	-	22,5 °C	-	-	15,7 °C	16 m	-
4	-	21,5 °C	-	0,52	15,7 °C	16 m	-

En aquesta imatge infraroja, es distingeixen el forjat i la part inferior del pilar que conformen l'estructura de l'edifici, els quals es troben a més temperatura que la resta de la façana. En les dades anteriors, es pot comprovar com passem de tenir 12,3 °C en la façana, a 16,5 °C en la zona del forjat i pilar, el que suposa un pont tèrmic important. Aquest esdeveniment es deu a l'absència d'aïllament en el cantell del forjat i pilar.

El punt 2 i 3, ens assenyalen l'efecte de dues finestres obertes, per on s'escapa aire interior calent, i que contribueixen a disminuir el rendiment de les instal·lacions.

En referència al punt 4, ens mostra les pèrdues energètiques que es produeixen per la fusteria de les finestres, la qual no està dissenyada contra trencament de pont tèrmic, i per les caixes de persianes les quals no estan aïllades. També es pot visualitzar l'efecte de la llinda metàl·lica que s'ha explicat anteriorment, la qual té facilitat d'acumulació de calor, ja que es un bon conductor tèrmic.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D, del termograma:

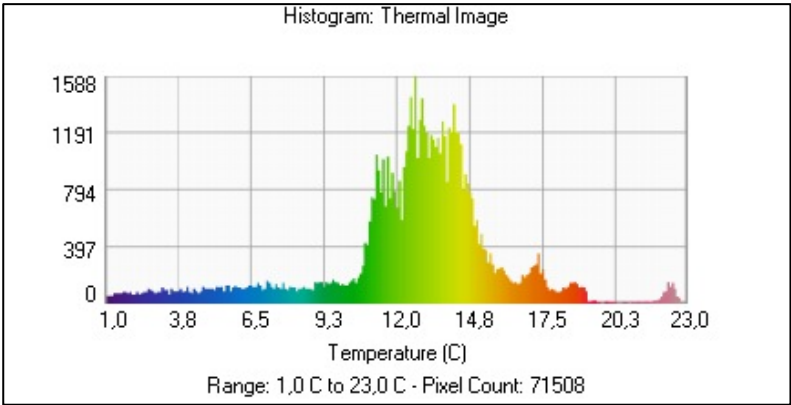


Figura 1.38: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

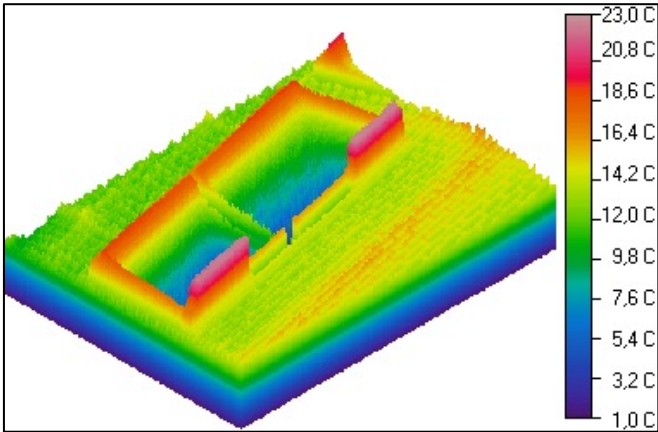
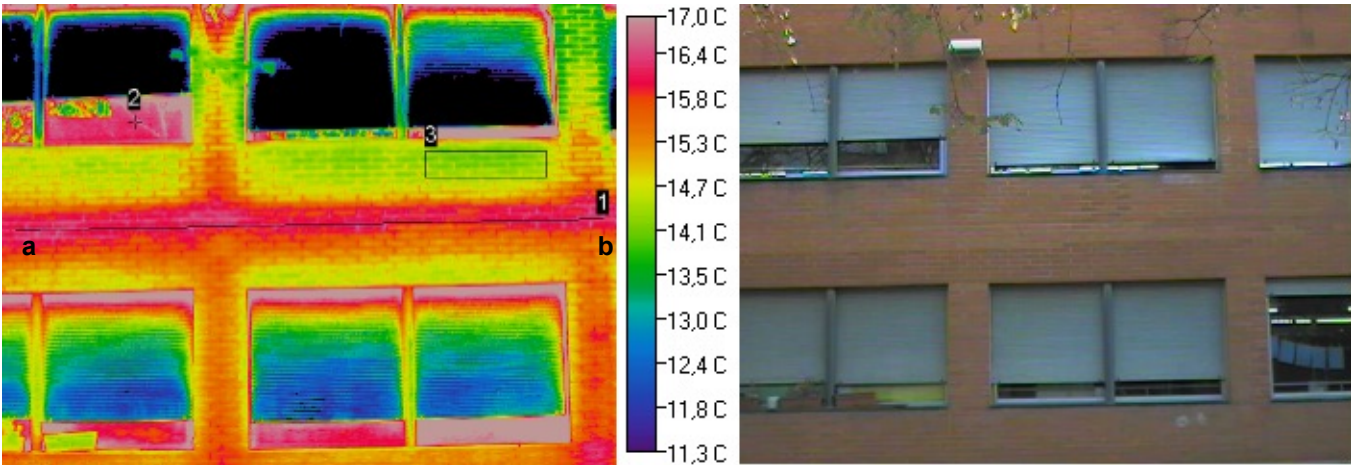
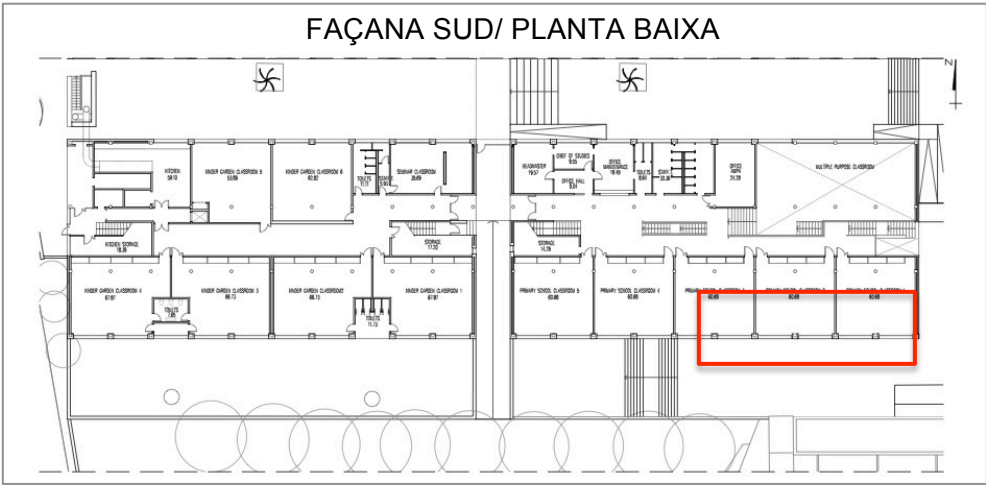


Figura 1.39: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 3:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	15,9 °C	16,9 °C	16,4 °C	0,93	15,9 °C	11 m	4,05 m
2	-	16,3 °C	-	-	15,9 °C	11 m	-
3	13,8 °C	14,9 °C	14,3 °C	0,93	15,9 °C	11 m	0,16m ² /2,03

En la imatge infraroja es pot visualitzar clarament l'estructura de l'edifici composta per forjats i pilars de formigó, on existeixen ponts tèrmics importants, degut a una incorrecta solució constructiva, ja que l'aïllament no es continu pels fronts dels forjats (veure figura 7.40). També es pot observar la fusteria poc estanca, per on deixa sortir aire calent interior, ja que com s'ha esmentat anteriorment, no està dissenyada contra trencament de pont tèrmic.

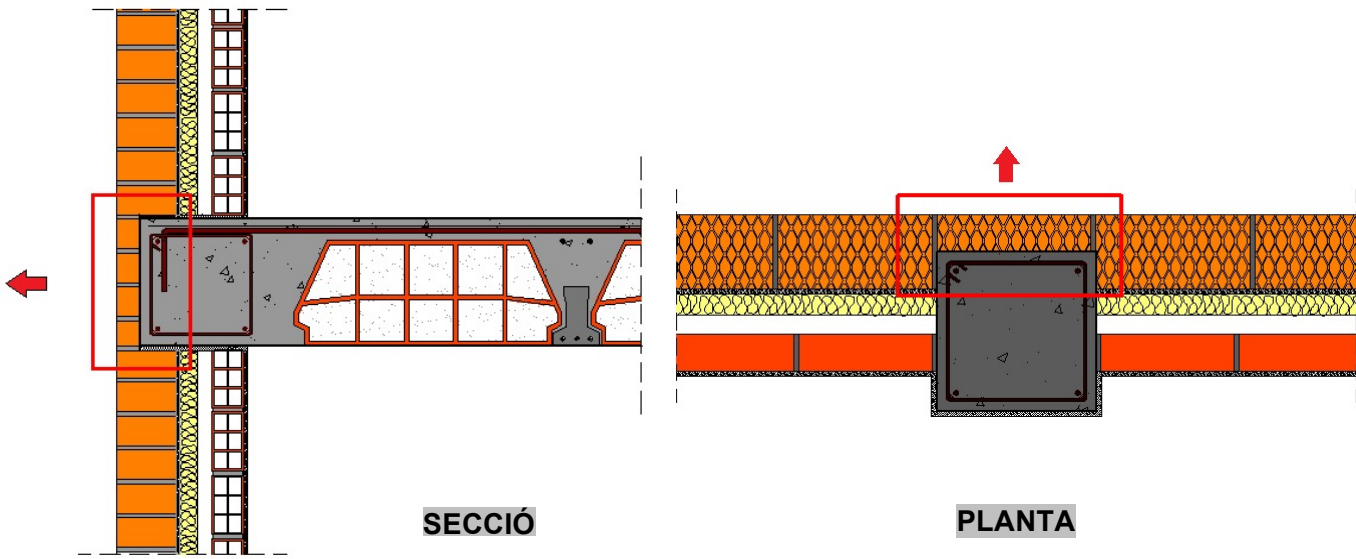


Figura 1.40: Detall del pont tèrmic en la trobada del forjat amb la façana i pont tèrmic en la trobada del pilar amb la façana (Font: Elaboració pròpia)

En el punt 2 podem detectar que existeixen fonts de radiació al nostre voltant, que poden afectar de manera decisiva en el resultat de la imatge, com en el cas dels vidres, on la temperatura no és la correcta a causa d'aquestes reflexions.

L'àrea 3 vol mostrar la temperatura a la qual es troba la façana, per veure la diferència de temperatura amb la zona del forjat i pilars. Podem comprovar que es tracta d'una diferència de temperatura de 3,5 °C.

Si observem detalladament la imatge infraroja, podem constatar que les aules de la planta inferior es troben ocupades, i amb els radiadors en funcionament, i per aquest motiu escalfa el forjat superior i part dels pilars. A més també es pot observar que la temperatura de l'ampit de les finestres inferiors és superior, a l'ampit de les finestres superiors, ja que els radiadors de la planta baixa, es troben en funcionament, i l'aïllament deficient deixa escapar la calor interior.

A continuació es presenten tres gràfics amb les diferents temperatures de la línia 1:

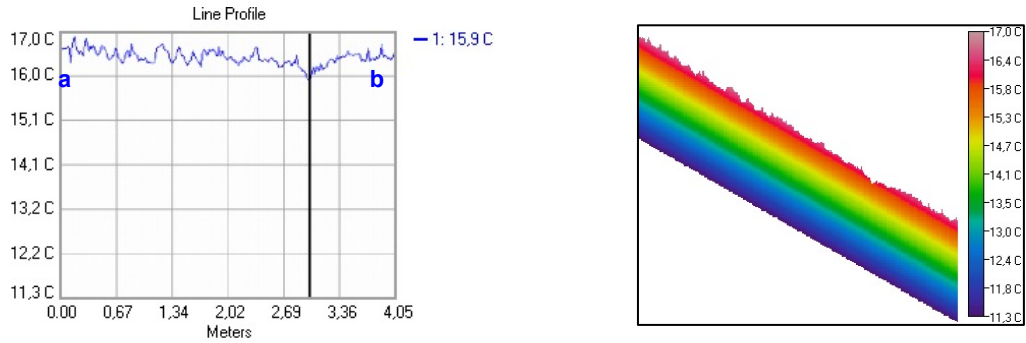


Figura 1.41: Gràfic i perfil del comportament tèrmic línia 1 on es pot visualitzar la temperatura en diferents punts d'un mateix element constructiu (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D, del termograma:

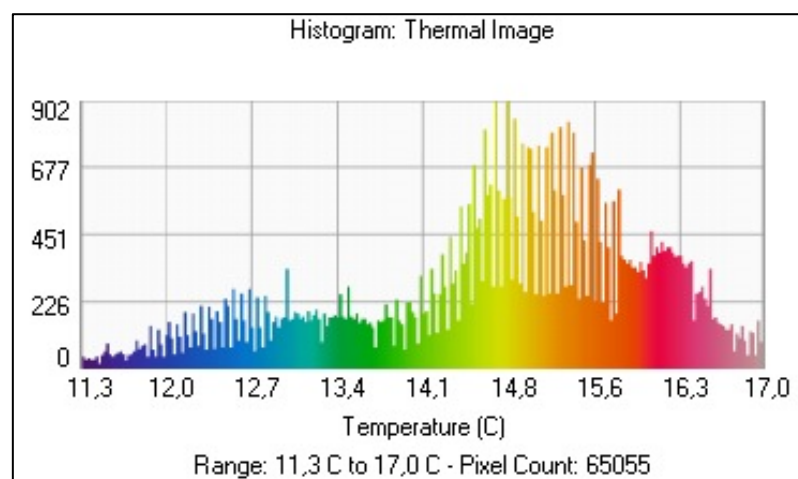


Figura 1.42: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

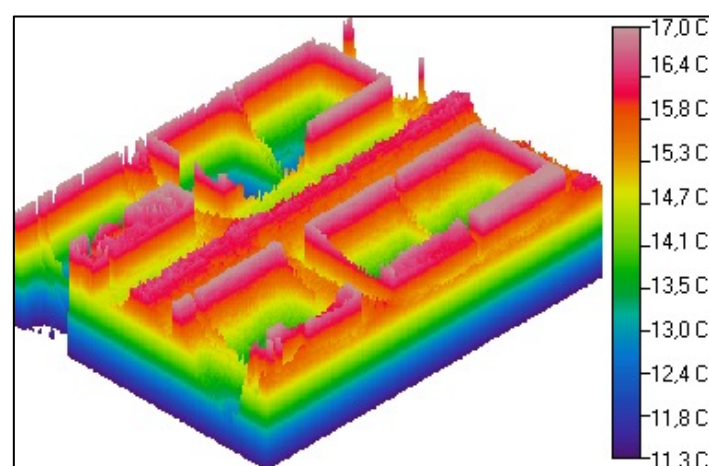
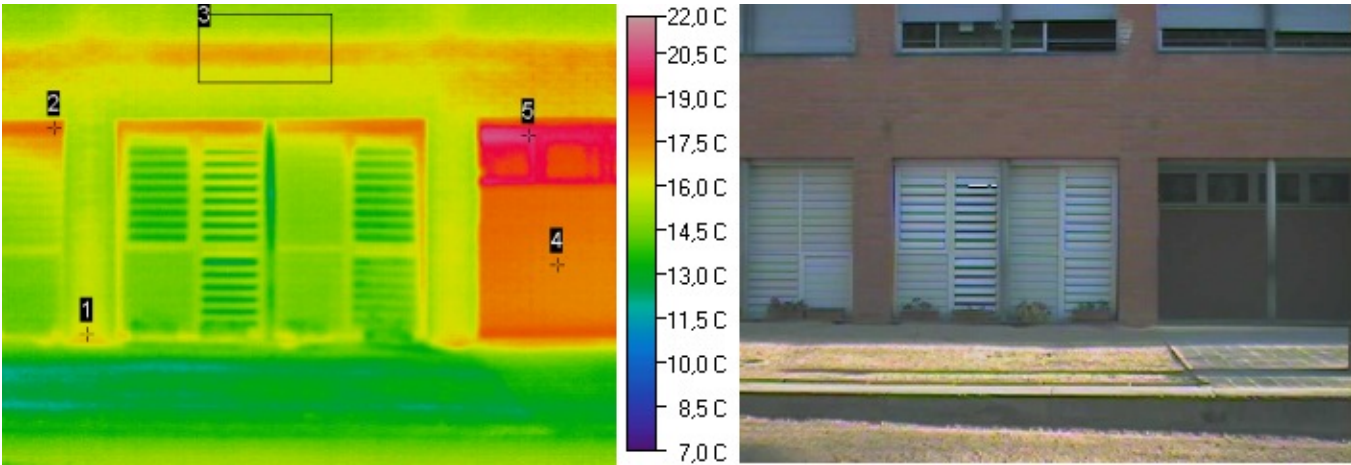
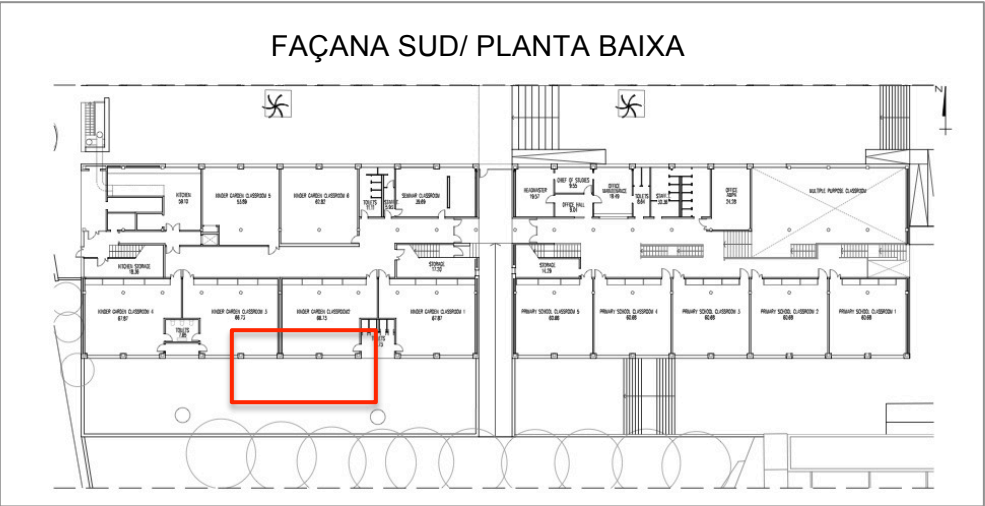


Figura 1.43: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 4:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-	16,5 °C	-	0,93	15,9 °C	11 m	-
2	-	18,7°C	-	0,94	15,9 °C	11 m	-
3	14,9 °C	17,6 °C	16,3 °C	0,93	15,9 °C	11 m	2520 m ²
4	-	17,8 °C	-	0,93	15,9 °C	11 m	-
5	-	22 °C	-	0,77	15,9 °C	11 m	-

El punt 1 d'aquest termograma, ens indica una fuga de temperatura per la part inferior del pilar, en la trobada amb el terra (cota 0,0). Aquest augment de temperatura en aquesta part, pot ser deguda a un defecte de l'aïllament en aquest punt de la façana, o un defecte de l'ajustament del tancament.

El punt 2, ens mostra el pont tèrmic que es produeix per la fusteria de les finestres, ja que no estan dissenyades contra trencament de pont tèrmic.

En l'àrea 3, podem comprovar clarament els ponts tèrmics que s'originen en els forjats, ja que els cantells no estan aïllats correctament.

El punt 4, ens indica la paret d'un entrant de façana, la qual no té aïllament o aquest és deficient, i per on existeixen pèrdues energètiques elevades. En el termograma i gràcies a la paleta de colors, es pot distingir clarament aquest augment de temperatura, a 17,8 °C. El punt 5, ens mostra el pont tèrmic que s'origina per la fusteria de les finestres, les quals no tenen trencament de pont tèrmic.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D, del termograma:

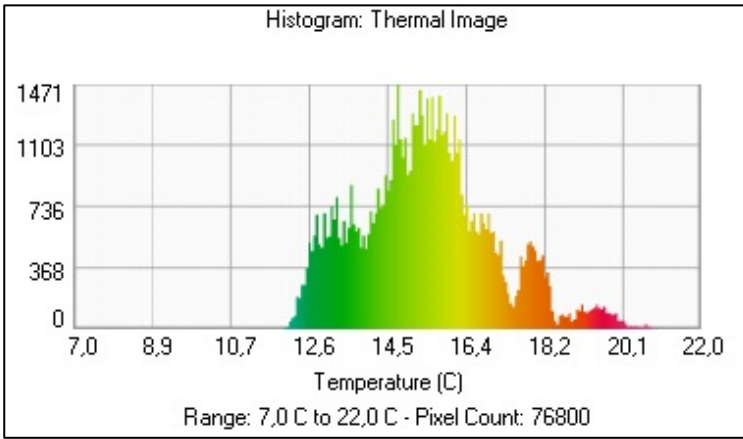


Figura 1.44 Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

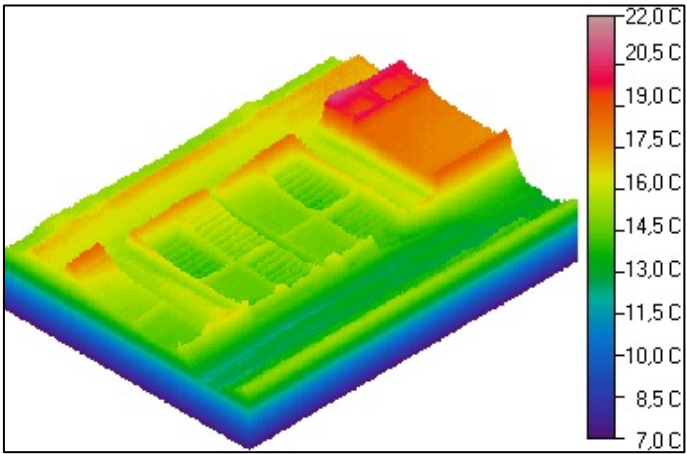
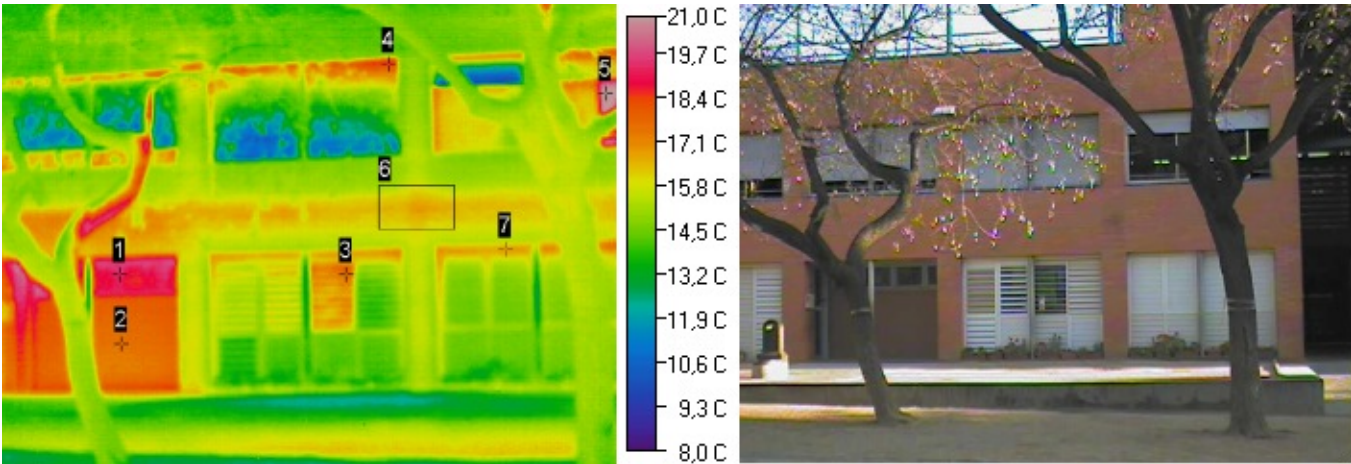


Figura 1.45: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 5:

- Ubicació:



Àrea/Punt	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-	20,4 °C	-	0,77	15,7 °C	16 m	-
2	-	17,8 °C	-	0,93	15,7 °C	16 m	-
3	-	17,7 °C	-	-	15,7 °C	16 m	-
4	-	21,1 °C	-	0,52	15,7 °C	16 m	-
5	-	21,6 °C	-	-	15,7 °C	16 m	-
6	15,2 °C	17,1 °C	16,4 °C	0,93	15,7 °C	16 m	0,34m²/808,83
7	-	17 °C	-	0,94	15,7 °C	16 m	-

El punt 1 i 2, ens indica el pont tèrmic originat per la manca o un deficient aïllament de façana i la carència de trencament de pont tèrmic en la fusteria de les finestres, tal i com s'ha citat anteriorment en el termograma anterior. El punt 3 i 5, fan referència a una finestra oberta, per la qual s'escapa aire calent. En el cas de la finestra 3, aquesta no té una temperatura molt elevada com en el cas de la finestra 5, ja que davant de les finestres de la planta baixa, hi han mallorquines de lamel·les variables,

que no deixen mesurar directament la temperatura de les mateixes, però la imatge infraroja, deixa evident que es tracta d'una finestra oberta.

El punt 4 i 7, ens indica els ponts tèrmics que s'originen per les fusteries de les finestres, ja que totes les finestres són d'alumini anoditzat sense trencament de pont tèrmic, el que provoca una via de sortida d'energia interior cap a l'exterior.

L'àrea 6, ens torna demostrar una altre part de la façana on existeix pont tèrmic en el forjat. Això vol dir, que l'execució dels forjats s'ha realitzat de forma regular, ja que existeixen ponts tèrmics en tots els forjats, però de manera deficient ja que no s'han aïllat correctament els cantells.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D, del termograma:

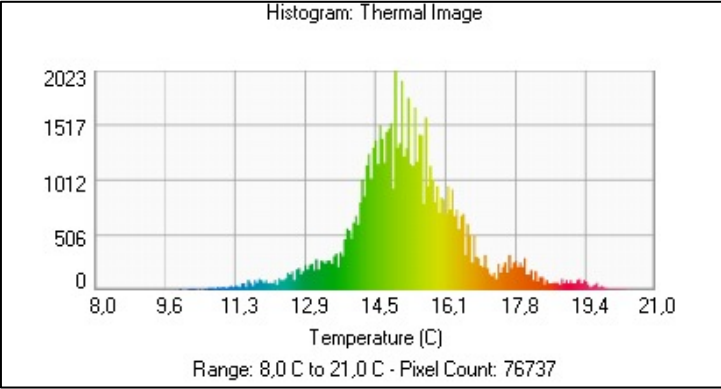


Figura 1.46: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

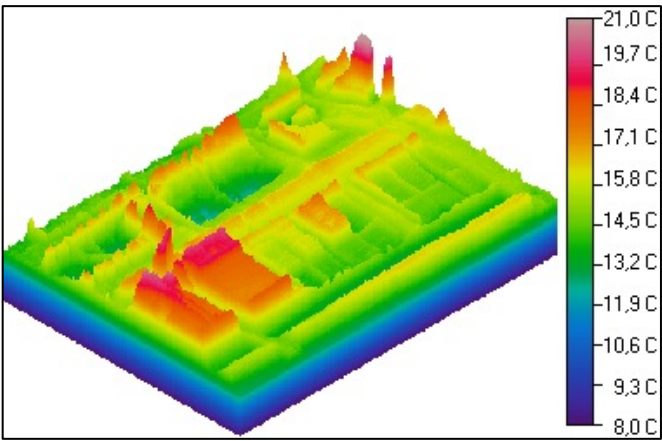
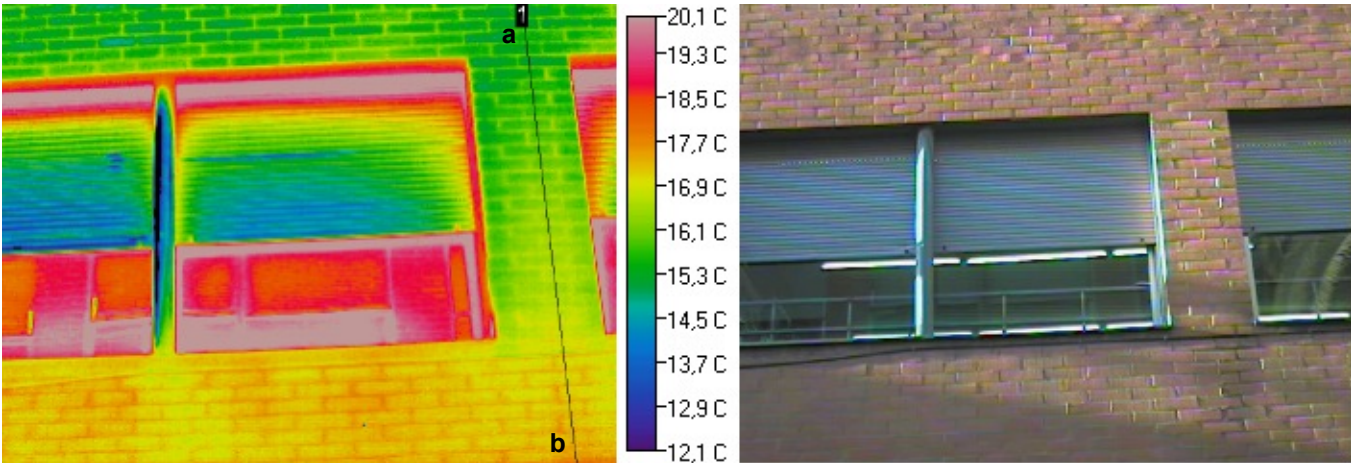
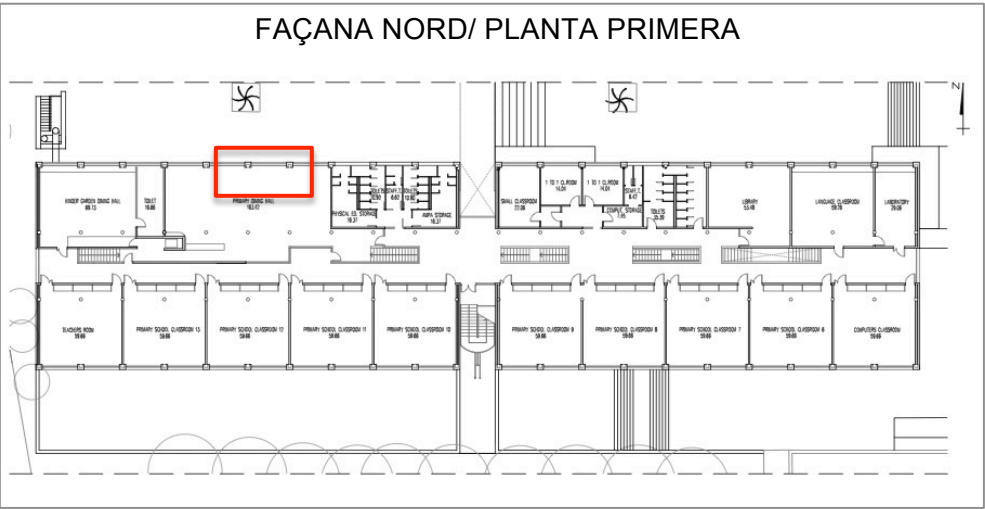


Figura 1.47: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 6:

- Ubicació:



Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	14,9 °C	18 °C	16,5 °C	0,93	16,2 °C	11 m	3,10 m

La línia 1 d'aquest termograma vol mostrar l'evolució de temperatura que pateix la façana des del forjat superior al forjat inferior d'un mateix element constructiu (fàbrica de maó), durant l'alçada d'una planta. Aquest augment de temperatura és ocasionat pels radiadors en funcionament que es troben en la part inferior del parament de l'aula. Podem comprovar que l'increment del valor de la temperatura aparent coincideix amb la posició dels radiadors que es troben en funcionament en l'interior de l'edifici. Aquest fet demostra que l'aïllament que compona la façana (segons memòria constructiva) és deficient o està desgastat, ja que s'estan produint pèrdues energètiques importants.

A continuació es presenta el gràfic de la línia 1, així com el perfil de temperatura de la mateixa, per poder visualitzar clarament l'evolució de temperatures d'aquesta zona de la façana:

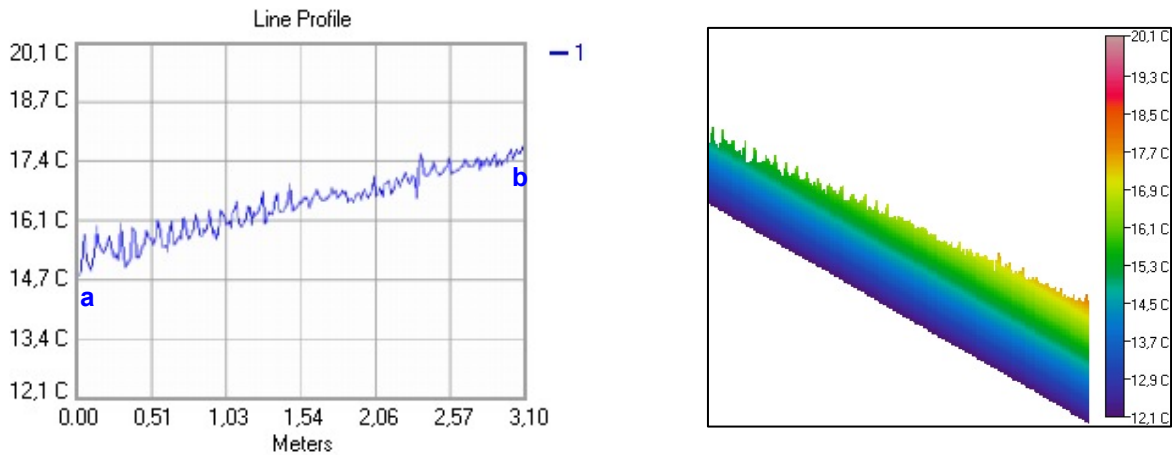


Figura 1.48: Gràfic i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

En aquest termograma es poden visualitzar les exfiltracions d'aire calent, que també es produeixen, per la fusteria de les finestres les quals no tenen trencament de pont tèrmic segons la memòria constructiva. La temperatura dels vidres no es pot mesurar correctament, degut a les reflexions exterior i interiors, que provoquen una variació de la temperatura final dels mateixos.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D, del termograma:

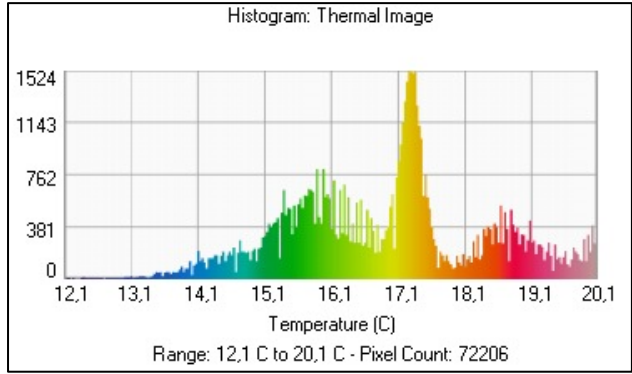


Figura 1.49: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

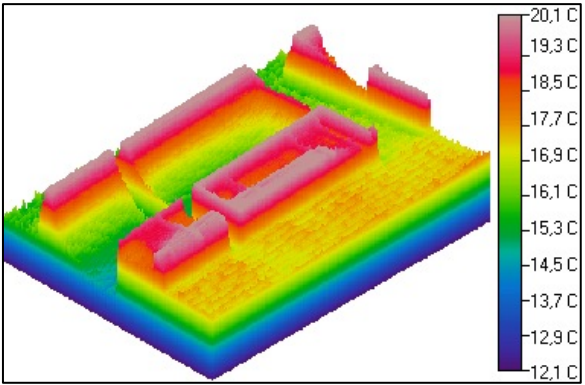
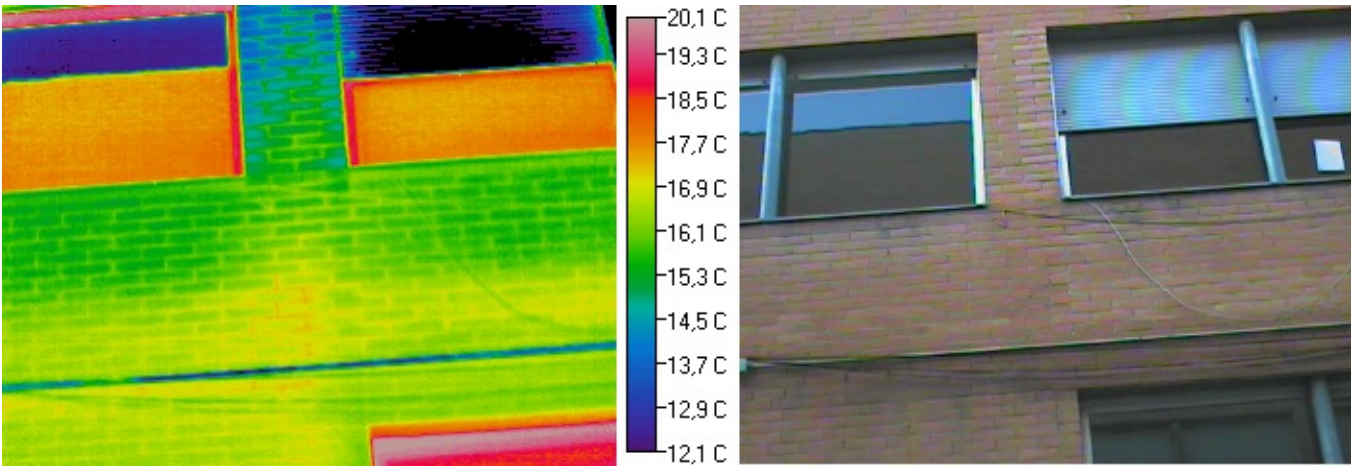
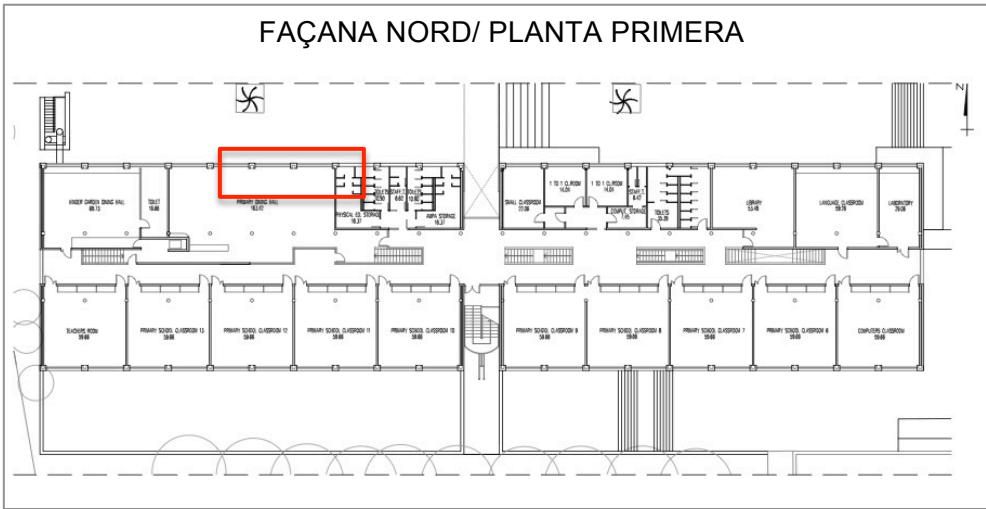


Figura 1.50: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 7:

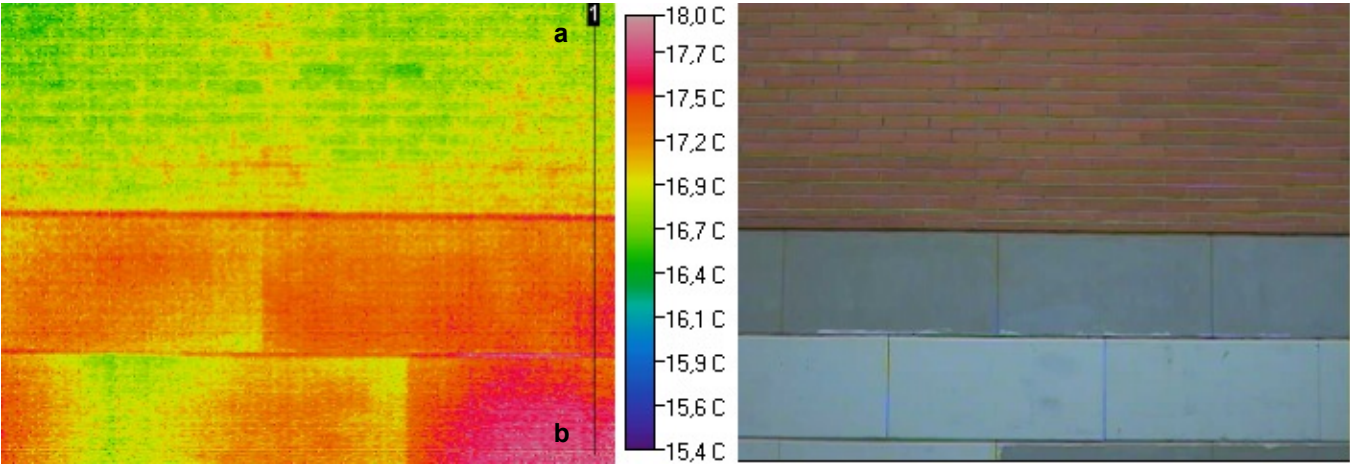
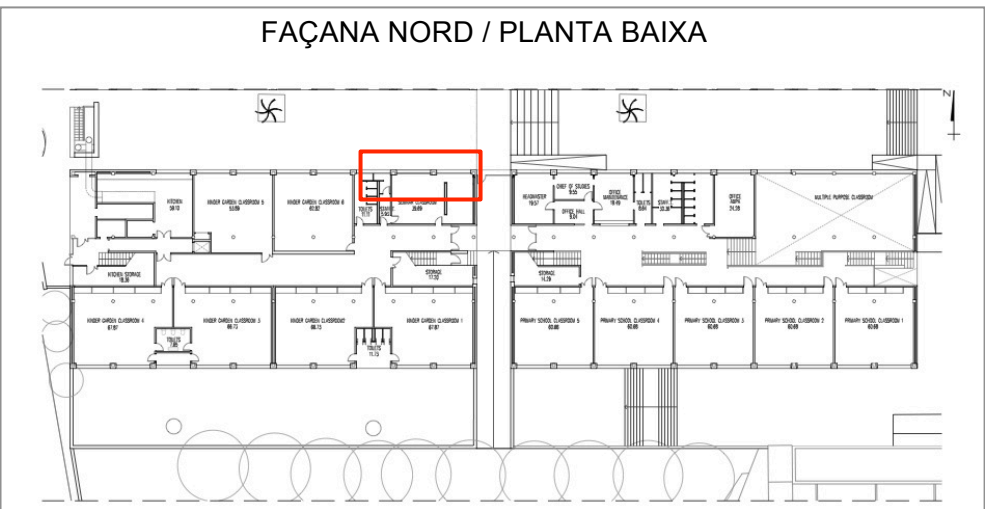
- Ubicació:



Amb aquest termograma es vol demostrar que a la façana Nord també existeixen ponts tèrmics en la zona del forjat i pilars, que conformen l'estructura de l'edifici, degut a la manca d'aïllament o al desgast del mateix. Els ponts tèrmics discontinus dels pilars, demostren la irregularitat de l'execució dels mateixos, ja que la zona superior es troba a una temperatura més baixa, que la zona inferior. Cal remarcar que la part superior de la planta primera es troba en contacte amb la coberta transitable de l'edifici. En referència als vidres de les finestres, no podem extreure conclusions fiables ja que existeixen reflexions interiors i exteriors, degut a l'angle de la presa de la imatge infraroja.

TERMOGRAMA 8:

- Ubicació:



Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mltja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	16,7 °C	18 °C	17,3 °C	0,93	15,9 °C	9 m	1,75 m

En aquesta imatge infraroja es pot visualitzar la diferència de temperatura entre dos materials diferents que componen la façana (fàbrica de maó i aplacat de pedra artificial). Es pot observar que la part inferior d'aplatat, està a major temperatura, que la part superior d'obra de fàbrica, i és degut a que en la part interior existeixen radiadors encesos. Per poder treballar sobre dades numèriques i gràfiques s'ha col·locat la línia 1, que ens donarà informació sobre els salts tèrmics.

A continuació es presenta el gràfic de la línia 1, així com el perfil de temperatura de la mateixa, per poder visualitzar clarament l'evolució de temperatures d'aquesta zona de la façana:

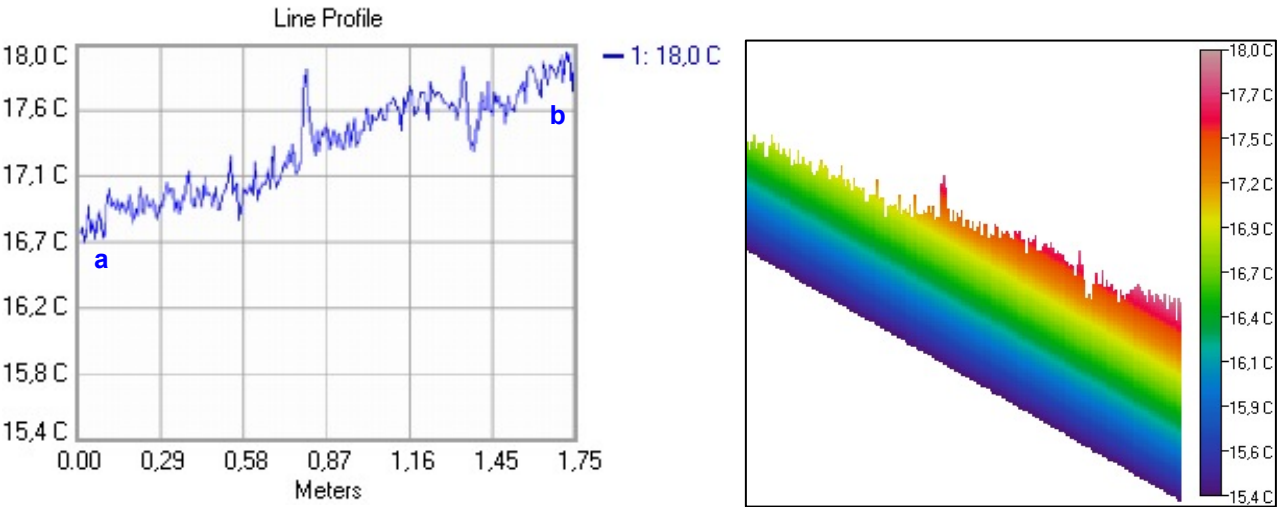


Figura 1.51: Gràfic i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

Seguidament es presenta una imatge en 3D, del termograma, o en es visualitzen amb claredat les diferents distribucions tèrmiques de la façana. Si en fixem detingudament en la part inferior dreta de la figura, observem que existeix un augment de temperatura, coincidint amb la situació dels radiadors, els quals com hem citat anteriorment, es troben en funcionament:

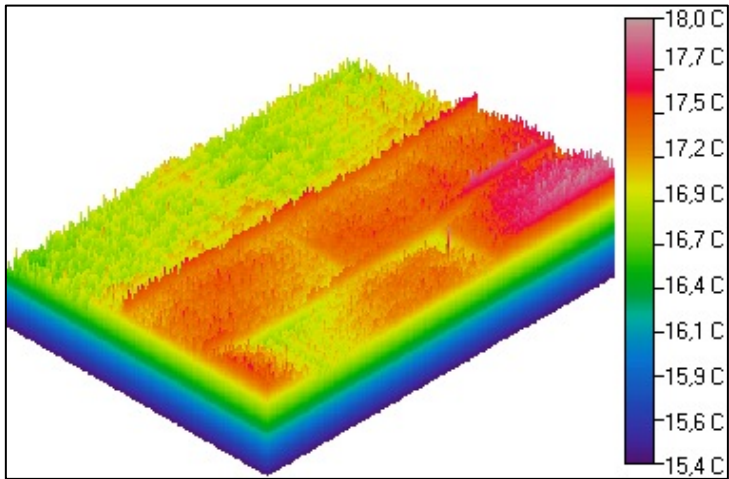
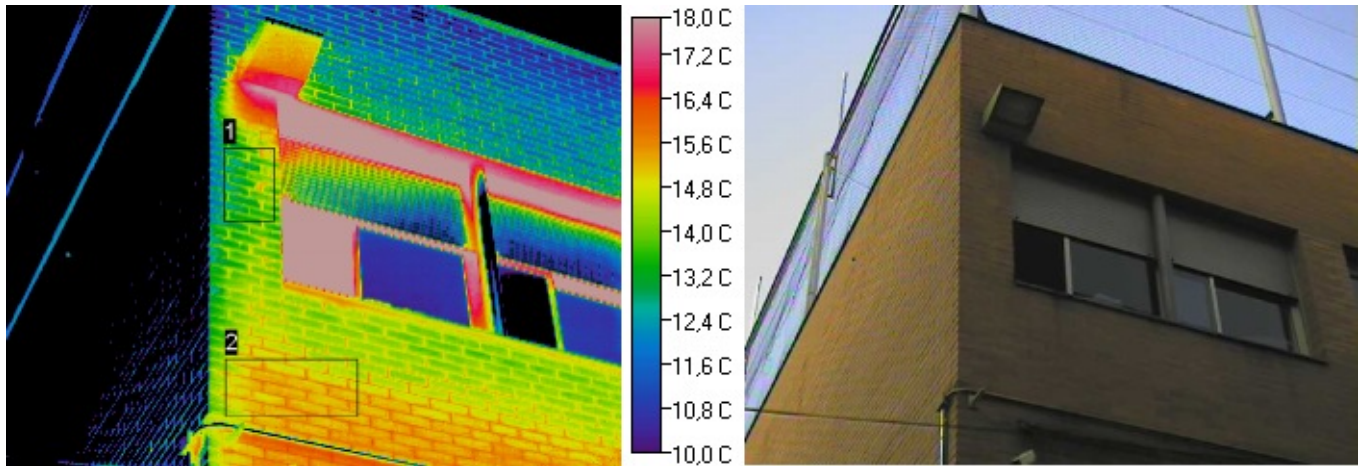
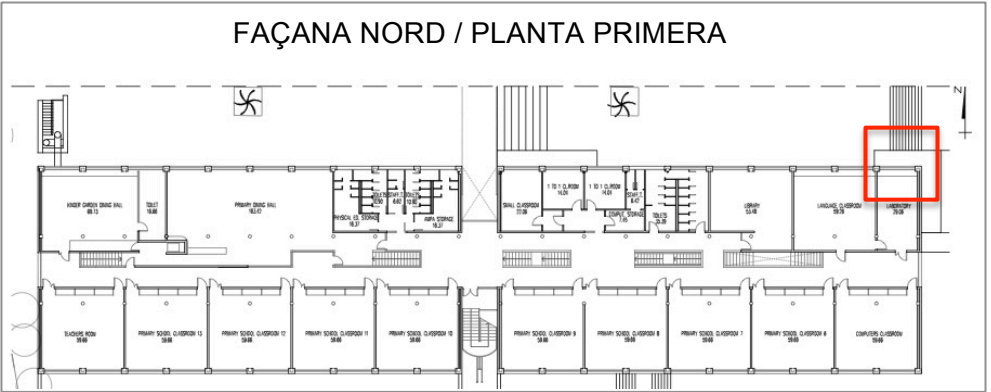


Figura 1.52: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

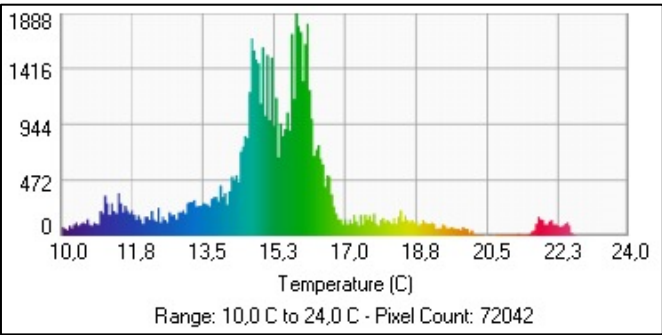
TERMOGRAMA 9:

- Ubicació:



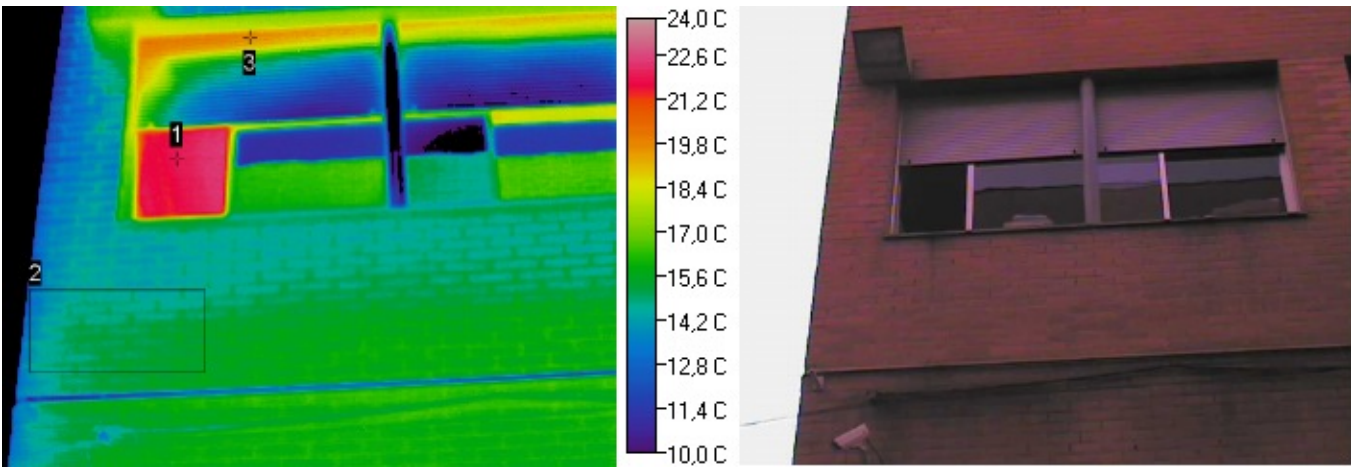
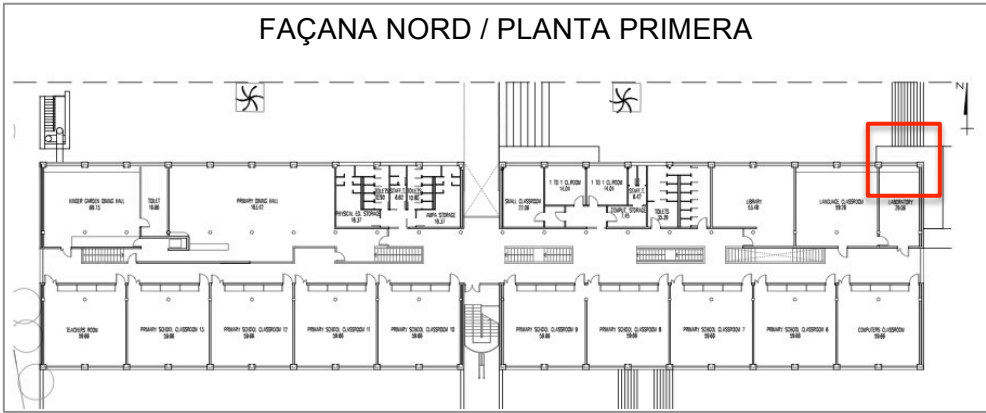
Àrea	T°. Mìn	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	11,9 °C	15,7 °C	13,6 °C	0,93	15,9 °C	11 m	0,18m ² /3,01
2	14,1 °C	16,1 °C	15,2 °C	0,93	15,9 °C	11 m	0,36m ² /1,92

En aquesta imatge, podem observar que la zona superior de la façana es troba a temperatura baixa, ja que es tracta d'una regió en contacte amb el terra de la coberta. La façana Est, no es pot valorar ja que degut a l'angle de la presa de la imatge, es reflecteix el cel, i podem extreure una conclusió fiable. Les àrees 1 i 2, ens volen demostrar les diferents temperatures que existeixen en una mateixa façana. L'àrea 1, ens indica una zona on existeix humitat retinguda, per la dificultat de poder arribar a una temperatura estable en l'edifici. L'àrea 2 es troba a més temperatura, ja que en la cara interior estan els radiadors en funcionament, i tal i com hem dit anteriorment, l'aïllament deficient de la façana permet que es produeixin les pèrdues de calor.



TERMOGRAMA 10:

- Ubicació:

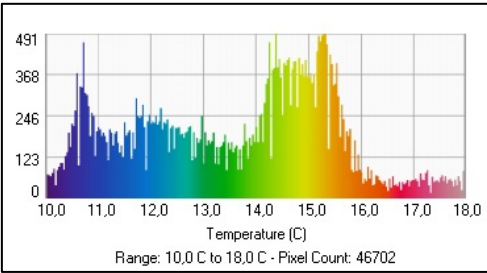


Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mltja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-	22,1 °C	-	-	15,9 °C	11 m	-
2	12,7 °C	15,9 °C	14,9 °C	0,93	15,9 °C	11 m	0,69m ² /4,99
3	-	23,2	-	0,52	15,9 °C	11 m	-

Aquesta imatge infraroja correspon a la mateixa part de l'edifici del termograma anterior, però amb la diferència de que l'angle de la presa de la imatge ha canviat.

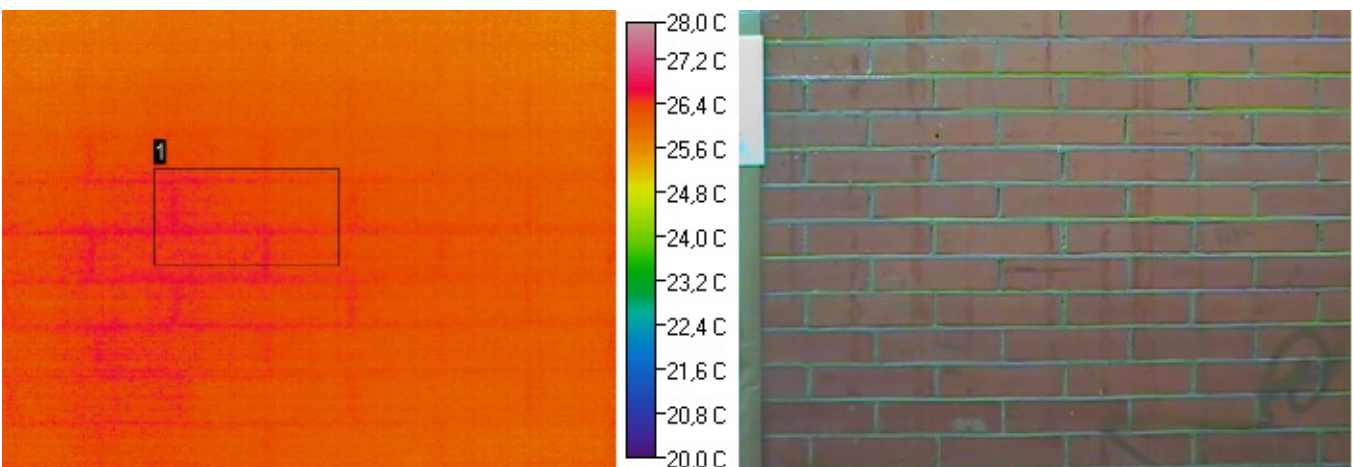
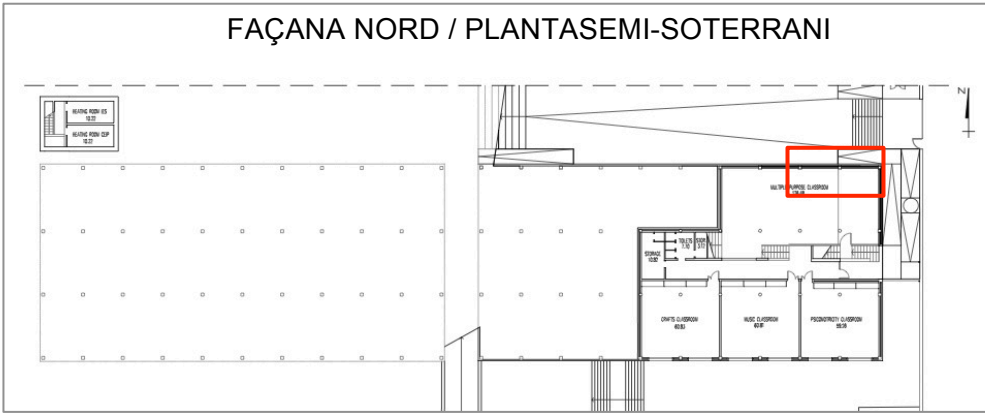
Podem comprovar que el punt 1, ens assenyalava una finestra oberta per la qual s'escapa calor interior, i que contribueix a disminuir el rendiment de les instal·lacions i a augmentar la demanda energètica de l'edifici. L'àrea 2, vol il·lustrar que la cantonada de la façana Nord es troba a una temperatura inferior que la resta de la façana, exactament a 12,7 °C, el que suposa una zona on hi ha excés d'humitat retinguda per la façana, i provoca condensació.

El punt 3, ens mostra el pont tèrmic que s'origina per la fusteria de les finestres, degut a la manca de trencament de pont tèrmic.



TERMOGRAMA 11:

- Ubicació:



Àrea	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mltja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	26,9 °C	27,9 °C	27,2 °C	0,93	15,8 °C	6 m	0,25m ² /26,28

Aquest termograma fa referència a una cantonada inferior de la façana Nord, on es pot comprovar que existeix una zona a temperatura més elevada que la resta de façana. Ens trobem en un cas puntual, ja que aquest fet és degut a que per la part interior discorre el pas d'una canonada de calefacció no aïllada tèrmicament, que en combinació amb l'aïllament deficient del parament, provoquen un augment de temperatura.

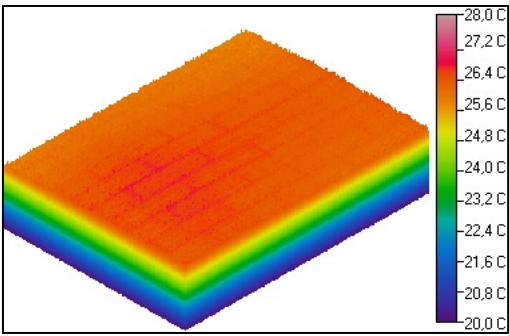
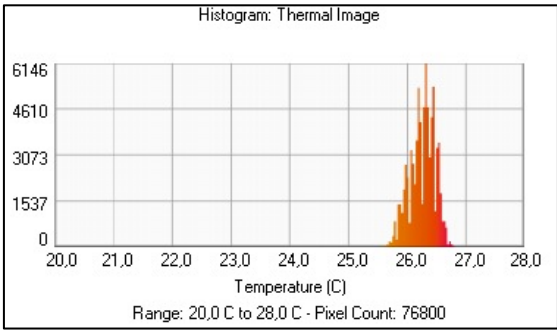


Figura 1.53: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

1.3.5 PROPOSTES D'ACTUACIÓ:

Un cop analitzades les imatges termogràfiques de l'edifici, es considera convenient treballar sobre mesures d'actuació, que es podrien duu a terme per millorar el comportament tèrmic de l'immoble.

La primera proposta d'actuació es tracta d'una solució que afecta al comportament dels usuaris. Els ocupants juguen un paper imprescindible en el comportament tèrmic de l'edifici, per aquest motiu la primera línia d'actuació s'enfoca en fer un ús correcte de l'obertura o el tancament de finestres i persianes, en funció de la temperatura interior de l'edifici i de la radiació solar rebuda durant tot el dia.

Continuant amb la conducta dels usuaris d'aquesta escola, s'ha de treballar l'apagat de les llums de les estàncies que no es troben ocupades, ja que segons el personal de l'Escola, així com informació facilitada pel company que ha realitzat l'avaluació energètica d'aquest edifici com a Projecte Final de Grau, afirmen que es produeix una despesa innecessària, ja que les llums d'algunes estàncies, com el menjador, sala de professors, despatxos, passadissos, etc. es troben en funcionament tant en horari lectiu com en horari no lectiu.

La segona proposta d'actuació fa referència a la instal·lació de calefacció, on es proposa aïllar tèrmicament les canonades vistes, que composen la instal·lació i que provoquen pèrdues energètiques, derivades del transport del fluid. Es proposa col·locar escuma elastomèrica de 30 mm de gruix, envoltant tota la secció de la canonada.

La tercera proposta d'actuació, s'enfoca en la substitució de la fusteria exterior de l'edifici. Com es pot comprovar en la memòria de l'edifici, així com en l'estudi de les imatges infraroges (per on s'observen grans pèrdues energètiques), les actuals fusteries no tenen trencament de pont tèrmic, ni tampoc doble vidre. Degut a les grans dimensions de les obertures, i la seva elevada transmitància tèrmica, gran part de l'energia es perd per les portes i finestres. Per solucionar aquest problema, es proposa substituir la fusteria actual, per fusteria d'alumini amb trencament de pont tèrmic, i vidre amb doble càmera.

La quarta proposta d'actuació es centra en treballar amb la pell de l'edifici. En l'anàlisi termogràfic realitzat, hem pogut comprovar que per la façana es produeixen grans pèrdues d'energia. Amb les dades de temperatura obtingues amb el present estudi termogràfic, i amb el recolzament del càlcul simplificat del COAC, realitzat pel company que ha realitzat l'avaluació energètica de l'edifici, podem comprovar que el tancament existent no compleix les exigències de transmitància tèrmica. Es proposa realitzar un trasdosat autoportant per l'interior de l'edifici, compost d'una capa d'aïllament i una capa de guix, sabent que aquesta actuació, que a la pràctica és la solució més viable i econòmica, tot i sabent que comporta la reducció d'espai interior de l'edifici. D'aquesta manera també es solucionaran els ponts

tèrmics dels fronts de forjats i pilars, i es compliran amb les exigències de transmitàncies tèrmiques segons normativa.

La cinquena proposta és realitzar un cel ras sota el forjat de la planta coberta per complir les exigències de transmitància tèrmica, ja que en el termograma 9 s'ha pogut observar un salt tèrmic.

1.3.6 CONCLUSIONS:

Per reduir de forma permanent i significativament el consum d'energia i les emissions de CO₂ d'aquest edifici escolar és necessari treballar sobre les línies d'actuacions proposades, prioritzant les ajudes públiques cap a aquelles mesures que contribueixin a limitar la demanda energètica de l'edifici.

Com ja coneixem, i estem atenent constantment, una de les parts fonamentals en l'eficiència energètica d'un edifici és la seva envolupant, ja que és per on es produeixen la major quantitat de pèrdues energètiques.

Gràcies a aquest estudi termogràfic, s'han pogut identificar els punts crítics de l'epidermis de l'edifici de forma visual i més entenedora, i amb el suport dels càlculs realitzats en l'avaluació energètica s'ha pogut comprovar que els valors de transmitància tèrmica tant de la part opaca com de la part translúcida, es troben fora dels rangs establerts com acceptables actualment.

Cal emfatitzar que la façana actual de l'edifici es compon d'una capa d'aïllament tèrmic, però la causa de les disfuncions detectades, és deguda a que es tracta d'un aïllament deficient, el que provoca pèrdues energètiques a l'hivern, i guanys a l'estiu, produint un desconfort als usuaris i un consum energètic superior al necessari.

En el cas de l'avaluació energètica realitzada per part del company, com a Projecte Final de Grau, poder afegir l'ús de la termografia, ha demostrat ser necessari, no només pel fet d'aportar dades reals a partir de les quals podem realitzar càlculs energètics que necessiten els informes de forma més detallada i concisa, i posteriorment poder extreure conclusions fiables, sinó per poder argumentar i justificar totes les hipòtesis generades durant l'estudi energètic, sense la necessitat de fer ús de mètodes destructius, per obtenir dades que la Termografia ens aporta de forma no invasiva.

En el supòsit de que es duguessin a terme les mesures proposades, es podria realitzar un nou estudi termogràfic, per poder comprovar de forma ràpida i precisa, les millores obtingudes en l'edifici, i poder verificar l'estalvi que suposen la implementació de les mateixes.

(Inspecció i informe termogràfic de façanes segons les directrius de la Norma Europea EN 13187:1999)

1.4 ANÀLISI TERMOGRÀFIC ESCOLA ISABEL DE VILLENA

En aquest anàlisi termogràfic, es pretén avaluar l'estat actual del tancament de façana de l'escola Isabel de Villena, fent recerca de possibles punts crítics que contribueixin a la presència d'humitat o a la pèrdua d'energia, d'aquest edifici construït fa 50 anys aproximadament.

1.4.1 INTRODUCCIÓ

L'edifici objecte d'estudi, fa referència a un edifici escolar construït als anys 60's, que es troba ubicat a la localitat d'Esplugues de Llobregat (Baix Llobregat), a la província de Barcelona, en el Carrer Joan Miró s/n.

La façana del Carrer Joan Miró està orientada al Nord, mentre que a façana del Carrer Anguera i Sala està orientada a l'Est.

L'edifici té una superfície de sòl de 3.454 m², i un sostre construït de 5325 m² (2.673,34 m² sobre rasant i 2.654,57 m² sota rasant). En pla general, sostre màxim edificable equipament 7a, 5181 m². També l'edifici s'inscriu dins dels gàlils màxims de la planta i el volum que estableix l'ordenació, tan mateix l'activitat és compatible i hi està permès l'ús al que és destina l'edifici.



Figura 1.54: Plànol de situació de l'edifici escolar Isabel de Villena (Font: Sede Catastro)

1.4.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DE L'EDIFICI

Tipologia d'edificació aïllada, composta de planta soterrani, quatre plantes pisos i planta coberta.

L'estructura de l'edifici està realitzada amb formigó armat, amb forjats unidireccionals amb un entrebigat de 30 cm.

Vers tot l'edifici trobem diferents tipus de tancaments exteriors. La façana de la planta soterrani està formada per una capa drenant, una capa impermeabilitzant, un mur de formigó armat, un enguixat i un revestiment protector. Una altra part de la façana soterrani està formada per una capa drenant amb làmines nodulars, una capa impermeabilitzant, un mur soterrani, un enguixat i un acabat amb pintura plàstica o amb un revestiment insonoritzant. La façana exterior de tot l'edifici és de dues fulles, i es compon d'una capa de morter monocapa, una capa de fàbrica de maó ceràmic buit, morter de ciment o cal, una cambra d'aire sense ventilar, una capa de fàbrica de maó ceràmic buit, l'enguixat i un acabat amb pintura plàstica. En les cambres humides de l'edifici, el tancament exterior de façana tindrà un acabat interior amb arrebossat de ciment i enrajolat ceràmic.

La coberta és no transitable amb acabat de graves. També existeixen teulades de xapa grecada, amb una capa de poliestirè expandit amb diòxid de carboni i una capa d'enlluït de guix, i xapa grecada sobre llosa de 20 cm amb una capa de llana mineral i cambra d'aire sense ventilar, en la coberta de la biblioteca.

En referència als buits verticals, hi han diferents tipologies de finestres en tot l'edifici. Es poden observar finestres de vidre senzill de 5 mm de gruix amb fusteria de PVC amb dos buits, finestres de doble vidre amb cambra d'aire (6/6/4) amb fusteria metàl·lica amb trencament de pont tèrmic i finestres amb vidre senzill de 5 mm amb fusteria de fusta.

En referència als buits horitzontals, es tracten de lluerns de vidre senzill de 5 mm de gruix amb fusteria metàl·lica

1.4.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI

1.4.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI:



Figura 1.55: Imatges de les diferents façanes de l'edifici (Font: Elaboració pròpia)

1.4.3.2 PLÀNOLS DE L'EDIFICI:

Planta Soterrani:

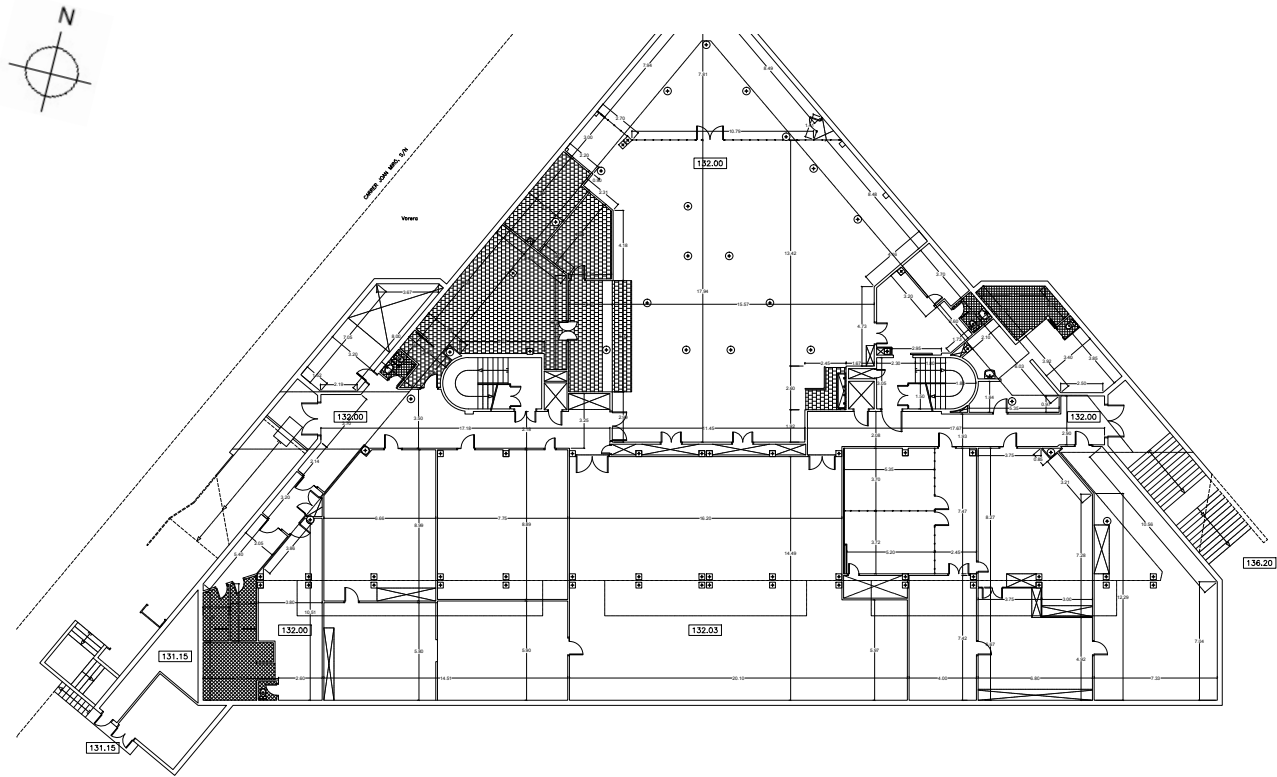


Figura 1.56: Plànol Planta Soterrani

Planta principal pati:

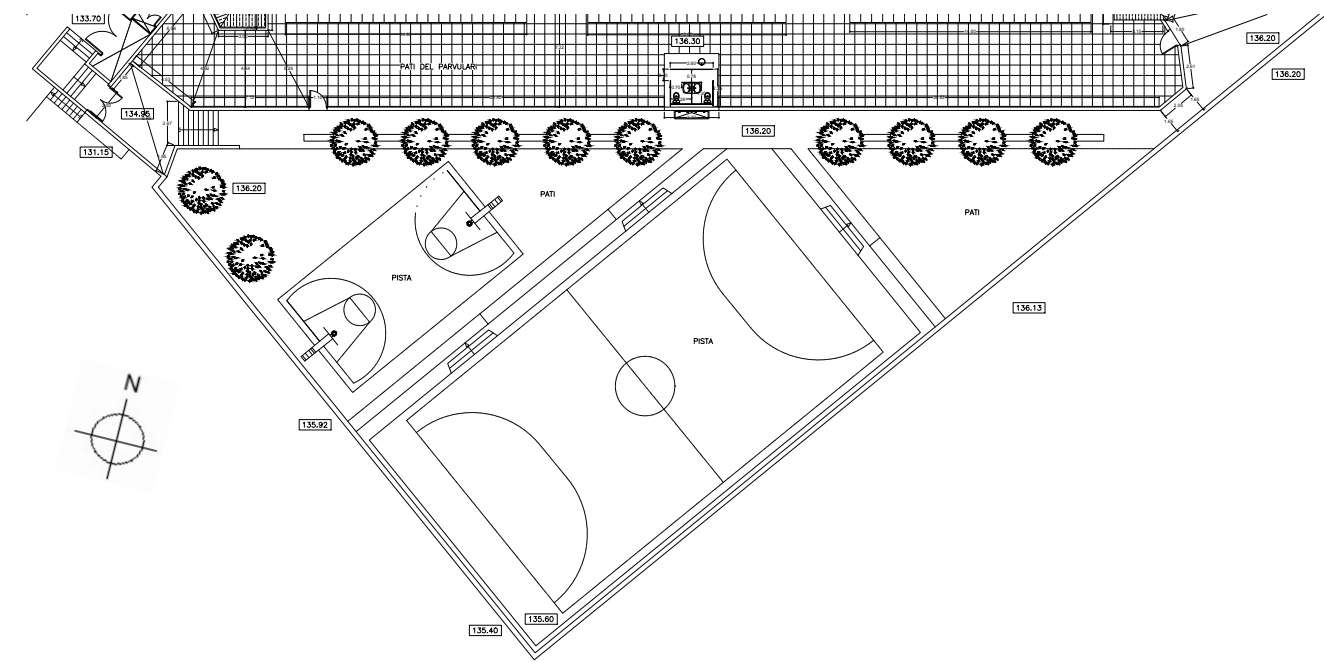


Figura 1.57: Plànol Planta Principal pati

Planta Coberta:

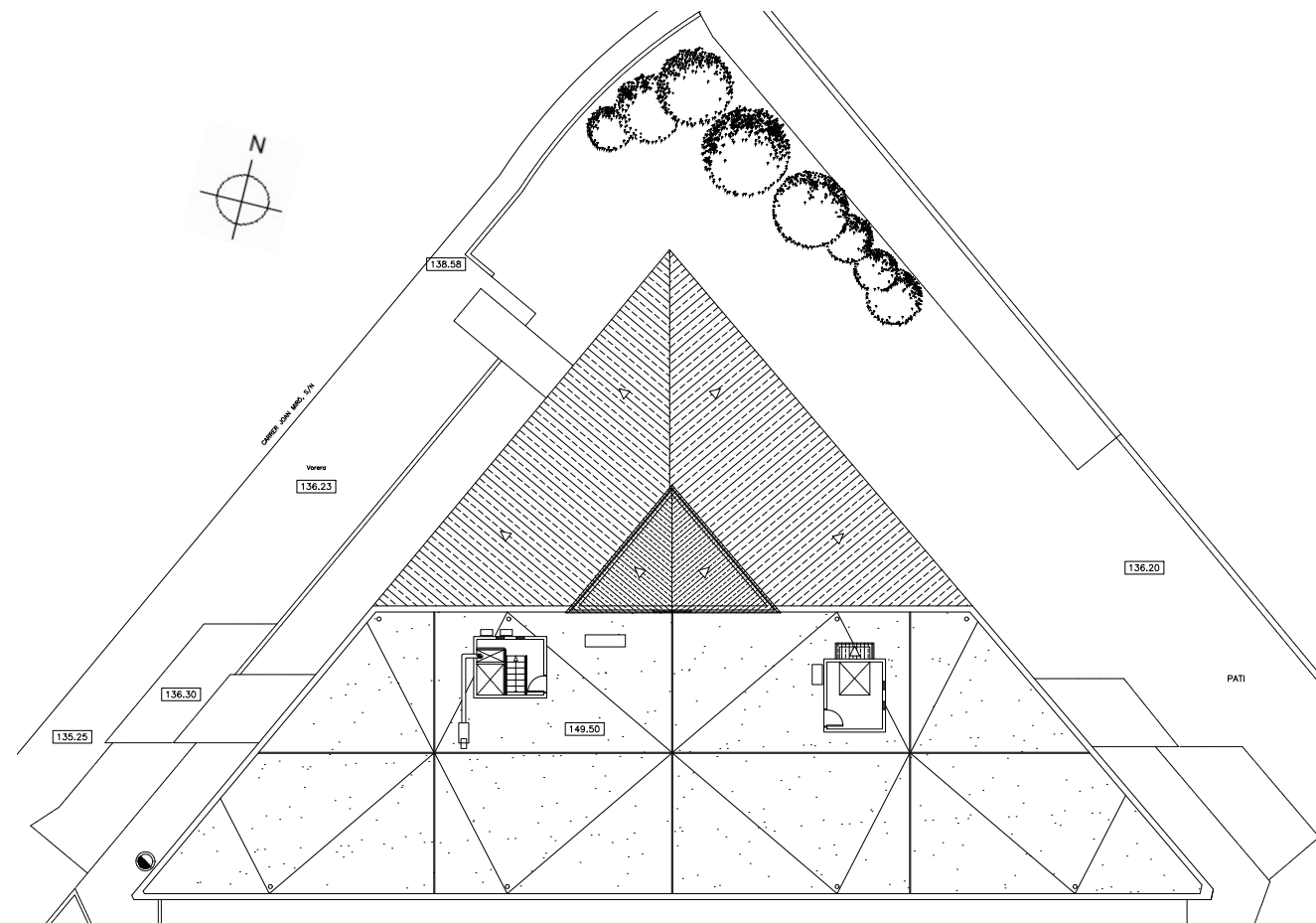


Figura 1.62: Plànol Planta Coberta

1.4.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS

L'avaluació energètica que s'ha realitzat en aquesta Escola, ha servit per determinar la necessitat d'implementar diverses actuacions en l'edifici, amb la finalitat de reduir les elevades pèrdues energètiques que pateixen les aules de l'escola. La majoria d'aquestes pèrdues energètiques són fruit de l'antiguitat de l'edifici, i per tant del desconeixement en aquell moment dels avanços que s'han anat produint en el camp de l'estalvi energètic.

Per duu a terme aquest estudi energètic, s'han utilitzat diferents equips de mesura, tals com: un luxòmetre i diferents higròmetres, que han servit per analitzar diferents variables.

Posteriorment amb aquest projecte s'ha complementat la avaluació amb l'ús d'una càmera termogràfica, la qual ens ha aportat dades numèriques, i imatges reals de la situació de l'edifici. Fet que ajuda a entendre amb facilitat l'estat de l'edifici, i és una mesura que pot ajudar a fer comprendre als usuaris la necessitat de realitzar canvis.

Les dades de la inspecció termogràfica s'han recollit amb una fitxa de recollida de dades, que s'exposa a continuació

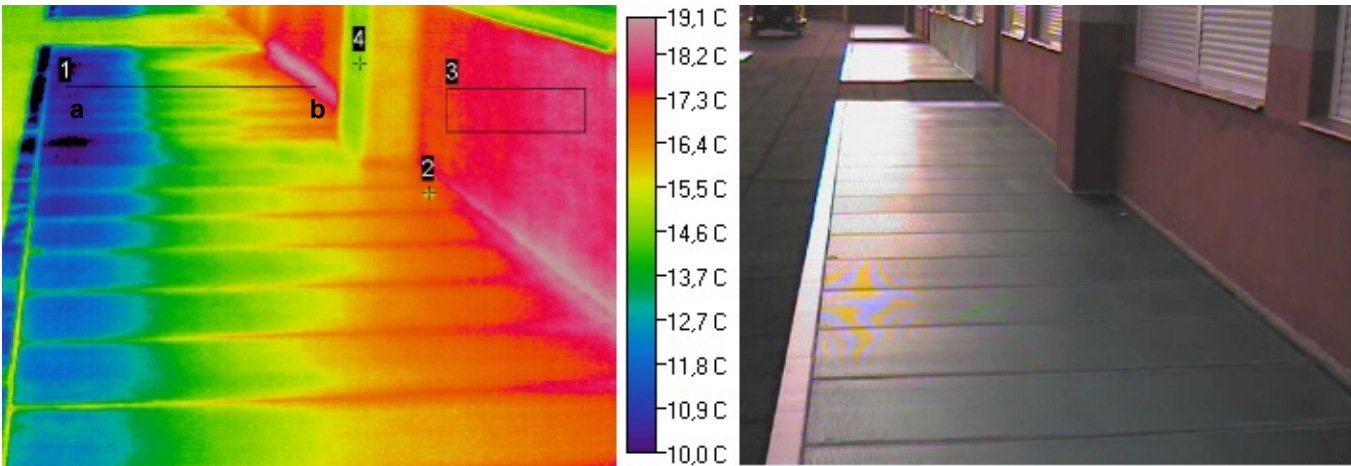
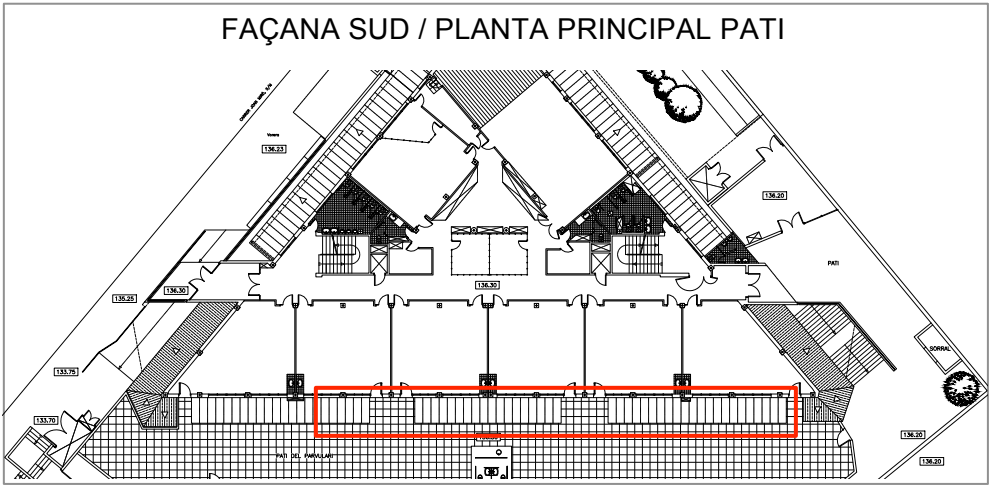
Localitat	Adreça	Nº	Vent: Direcció i velocitat	Orientació	Dia/mes/any	Hora	Estat del cel	Temp. Exterior	H % Exterior	Hora fi anàlisi
Esplugues de Llobregat	C/ Joan Miró	s/n	4 km/h - NE	Altitud	16 / 04 / 2012	19,58 h	Ennuvolat	12,9 °C	54 %	21 h

Nº Presa	Ubicació	Distància presa del termograma	Tº Exterior	Tº exterior 24 hores abans	Tº Interior	Tº Superficial	H % Exterior	H% interior	Observacions
TH910002/3 TH910006 TH910007 TH910008 TH910013	Façana Sud	2,10 m	12,9 °C	9 °C	18,8 °C	15,6 °C (paret exterior)	54,3 %	33,5 %	Existència de tendals. Claraboies en terra que pertanyen als sostres de les aules de la planta soterrani.
TH910010	Terra del pati de Façana Sud (silicona junta claraboia)	1,00 m	13,3 °C	9 °C	17 °C	17,1 °C	54,3 %	41,6 %	Avaluem el sostre de claraboia de les aules de la planta soterrani, corresponent al terra del pati de la Façana Sud. Observem una junta no segellada correctament amb silicona. Suposa una via important de pèrdues energètiques. També analitzem la diferència de temperatura del vidre i de la junta de silicona. Existència d'una junta no estanca, per on s'aprecien pèrdues energètiques.
TH9010004 TH9010005	Terra del pati Façana Sud (vidre claraboia)	1,00 m	13,3 °C	9 °C	17 °C	15,4 °C	54,1 %	41,6 %	
TH910011 TH910012	Façana Sud (pont tèrmic)	1,50 m	13,3 °C	9 °C	17,5 °C	16,8 °C	53 %	41,6 %	
TH910017	Façana Nord- Est (paret vermella façana)	7,00 m	13,8 °C	9 °C	18 °C	14,5 °C	53,2 %	40,3 %	-
TH910017	Façana Nord- Est (zona xapa)	7,30 m	12,7 °C	9 °C	-	12,7 °C	58 %	-	Façana composta per diferents nivells i diferents materials. Avaluem el revestiment de xapa
TH910016	Façana Nord- Est (soterrani)	9,10 m	13,3 °C	9 °C	-	13,8 °C (temperatura paret)	56,5 %	-	A la façana Nord-Est, trobem un accés a la planta soterrani mitjançant unes escales. Analitzem les temperatures, de la façana, ja que llinda amb una zona interior no condicionada tèrmicament, i es vol visualitzar si existeix diferència de temperatura entre exterior i interior.
TH910020	Façana Nord- Oest (vidre claraboia)	1,50 m	12,2 °C	9 °C	-	12,7 °C	63 %	-	Observem les temperatures de la claraboia que es troba a la façana Nord-Oest.
TH910021 TH910022 TH910023 TH910024	Façana Nord- Oest (entrada)	9,10 m	12 °C	9 °C	20°C	13 °C	61,6 %	-	Existència de vegetació (arbres), que produeixen ombra a l'edifici.

Taula 1.63: Fitxa de recollida de dades (Font: Elaboració pròpia, i Meteoclimatic.)

TERMOGRAMA 1:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	10,2 °C	18,8 °C	14,4 °C	0,94	13,3 °C	3 m	1,31 m
2	-	14,4 °C	-	0,94	13,3 °C	3 m	-
3	17,4 °C	19 °C	18,2 °C	0,93	13,3 °C	3 m	1679 m²
4	-	15 °C	-	0,93	13,3 °C	3 m	-

En aquesta imatge, es mostra el pont tèrmic que provoca la part de la claraboia, que conforma el sostre de la planta soterrani de l'Escola composta de vidre senzill de 5 mm de gruix amb fusteria metàl·lica sense trencament de pont tèrmic. Amb el gràfic de la línia 1, es pot observar com evoluciona la temperatura vers tot l'element. Tot i això, cal remarcar que la zona esquerra de la claraboia, on es poden observar temperatures mínimes (colors blaus), fa esment al reflex de la radiació solar (veure imatge digital), que comporta mesures confoses i que no podem valorar.

A continuació es presenta el gràfic de la línia 1, per poder visualitzar clarament l'evolució de temperatures que presenta aquest vidre, el qual conforma part del forjat superior de la planta soterrani:

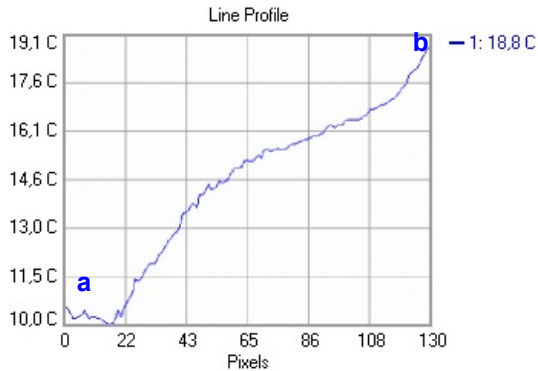


Figura 1.64: Gràfic del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

Si observem el punt 2, aquest figura a una temperatura inferior que la resta de la claraboia. Ens trobem en la situació de que la temperatura interior de la Planta Soterrani és més elevada que la temperatura exterior, i es produeixen pèrdues de calor de l'interior cap a l'exterior, pel vidre de la claraboia. Aquest punt 2, es tracta d'un forat el qual s'ha segellat amb silicona, i per on no es continuen produint pèrdues d'energia, però al tractar-se d'un material diferent, aquestes són mínimes.

En referència a l'àrea 3, es pot comprovar que la façana es troba a temperatura elevada, coincidint amb la posició dels radiadors, els quals acumulen calor en aquesta zona inferior, i aquesta s'escapa pel parament exterior, degut a la manca d'aïllament en la façana.

El punt 4 referent al pilar que conforma l'estructura de l'edifici, s'observen pèrdues energètiques mínimes, ja que la calor s'escapa més fàcilment pel parament exterior, on la secció és més petita.

En la imatge infraroja també es poden visualitzar les pèrdues d'energia entre paret de façana i terra, on la trobada no està ben resolta, i ocasiona un pont tèrmic important.

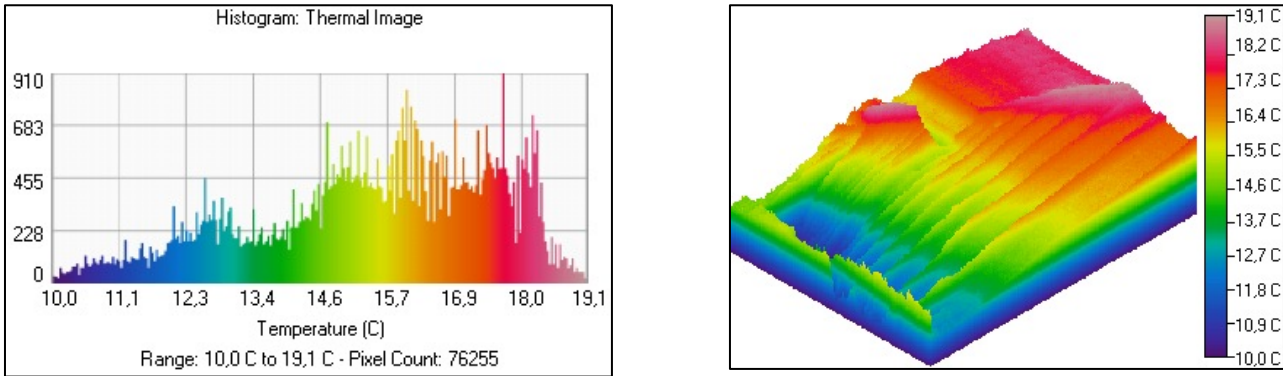
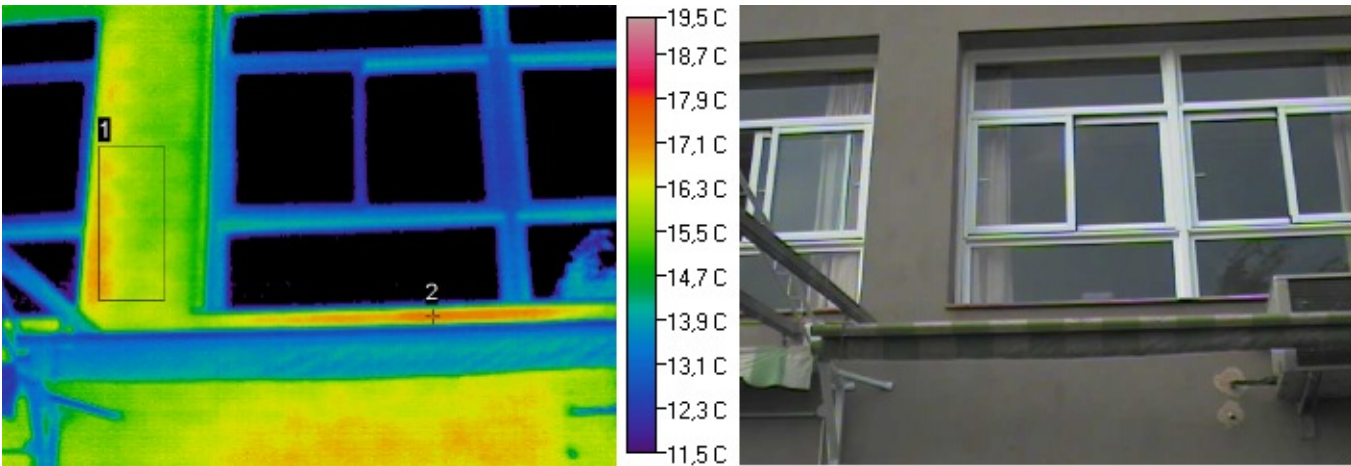
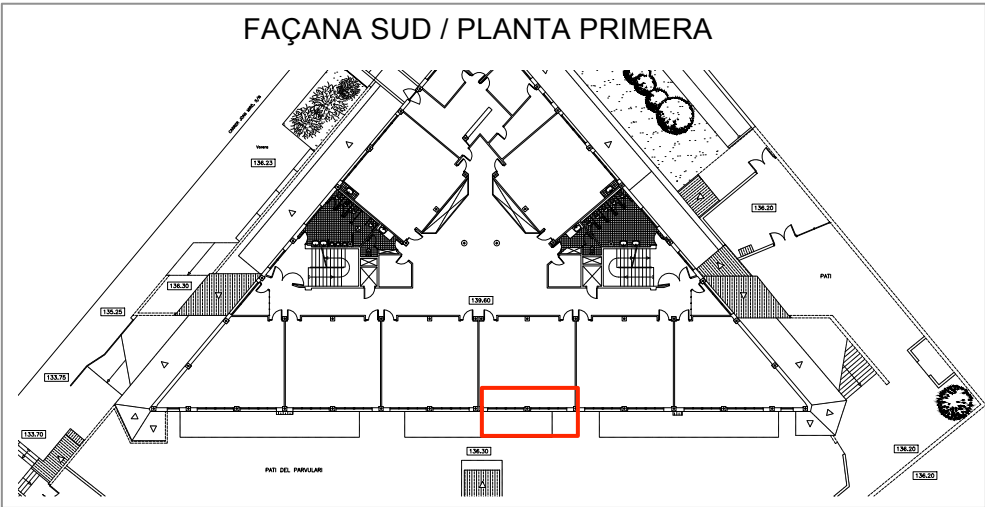


Figura 1.65: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 2:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	15,4 °C	17,5 °C	16,3 °C	0,93	12,9 °C	2,01 m	0,02m ² /0,50
2	-	17,6 °C	-	0,93	12,9 °C	2,01 m	-

Si observem la imatge infraroja exposada, podem comprovar que per les finestres de la façana Sud, no es generen pèrdues energètiques, ja que en relació amb la paleta de colors, els perfils es troben a temperatura molt baixa (com l'interior de l'edifici es troba a més temperatura que l'exterior, en cas de produir-se pèrdues energètiques per la fusteria o pel vidre, aquests haurien de tenir una temperatura elevada). També podem comprovar que la qualitat de l'envidrament està contribuint a reduir les pèrdues energètiques de l'edifici.

Aquest fet, és degut a que es tracten d'obertures de doble vidre amb cambra d'aire (6/6/4), i amb fusteria metàl·lica amb trencament de pont tèrmic.

Cal destacar que gràcies a l'angle de la presa del termograma, en aquesta imatge hem pogut valorar la temperatura dels vidres de les finestres, ja que els reflexes interiors i exteriors que es produeixen són mínims.

Paral·lelament, l'àrea 1 i el punt 2, ens marquen zones de la façana que es troben a més temperatura, i per tant per on es generen dissipacions de calor. Es tracten de dos ponts tèrmics importants, en els brancals i l'ampit de les finestres. Això és degut a que el tancament no és constant fins la línia del brancal i l'ampit, sinó que es tracten de peces tallades en el pla d'aquests, acció que crea un via de sortida de la calor interior. En el termograma següent es pot visualitzar clarament aquest pont tèrmic, i s'exposa un esquema, per facilitar la comprensió del mateix.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D, del termograma:

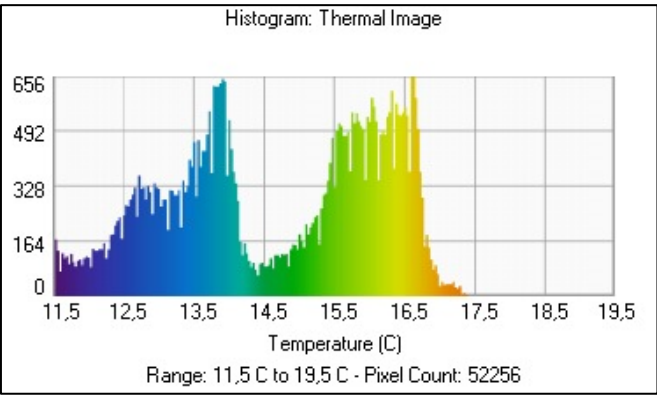


Figura 1.66: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

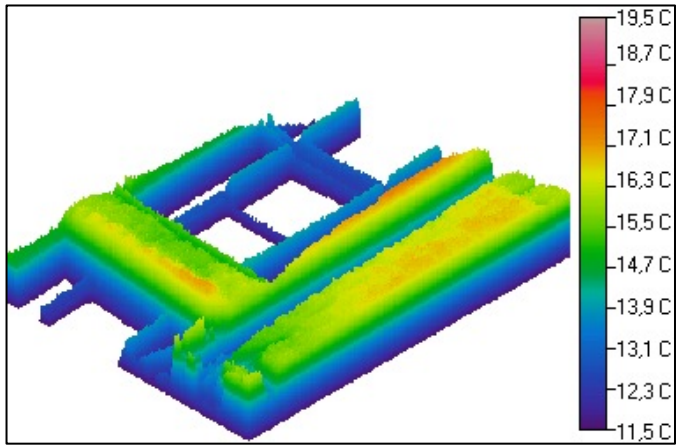
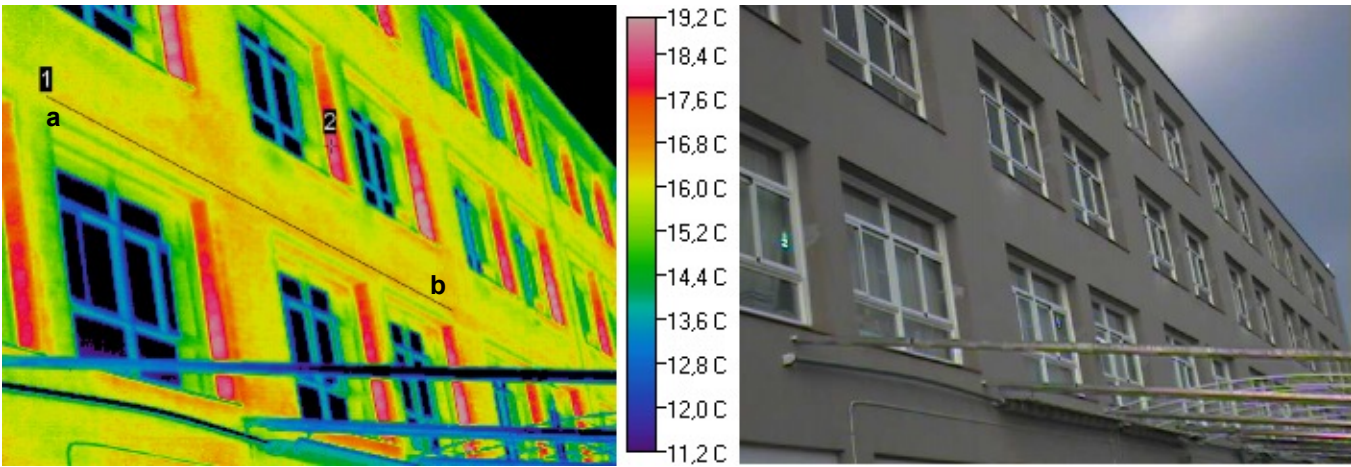
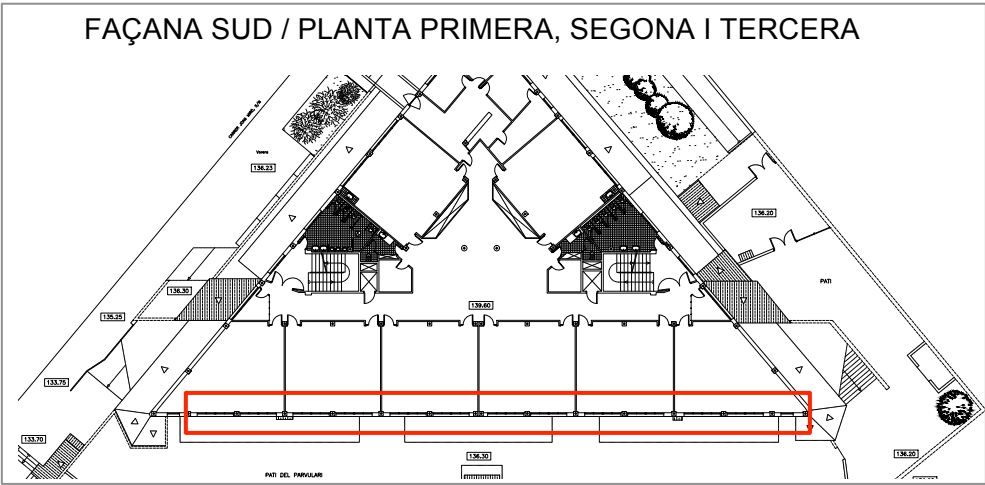


Figura 1.67: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 3:

- Ubicació:



Línia/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	16,3 °C	16,9 °C	16,7 °C	0,93	12,9 °C	6 m	1,52 m
2	-	19,1 °C	-	0,93	12,9 °C	6 m	-

En aquesta imatge termogràfica, es pot visualitzar clarament la situació del termograma anterior. Observem ponts tèrmics notables en els brancals de les finestres (punt 2), així com en els ampits de la façana Sud, per on s'estan produint pèrdues de calor importants. Tal i com s'ha citat anteriorment, aquests ponts tèrmics, són situacions típiques presents en moltes edificacions, i succeeixen degut a que la fusteria no s'ha col·locat en el buit de la càmera d'aire ubicada entre els dos murs, i el tancament no és constant fins la línia del brancal, sinó que es tracten de peces tallades en el mateix pla, acció que crea un via de sortida de la calor interior. A continuació s'exposen dos detalls constructius, on es visualitza la situació en la qual ens trobem, i com s'hauria de solucionar aquesta defecte constructiu per evitat el pont tèrmic:

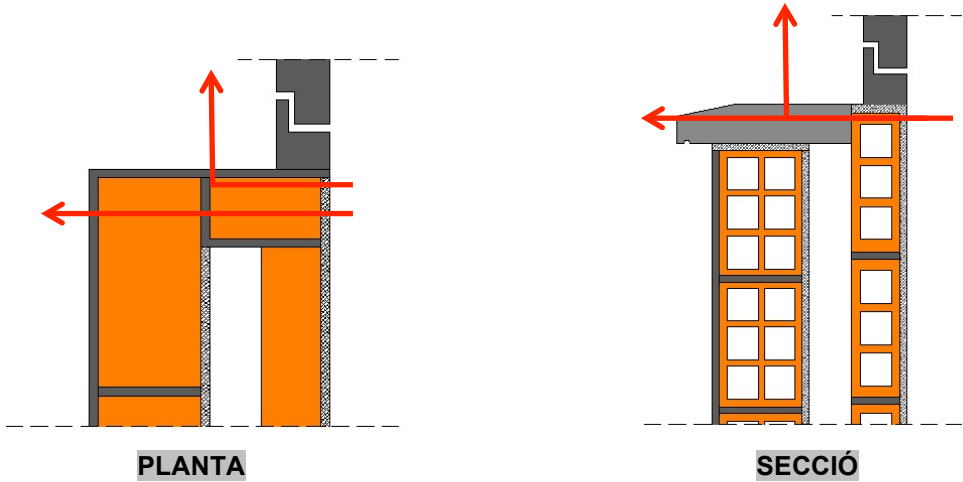


Figura 1.68: Detalls constructius trobada brancal amb fusteria exterior i trobada ampit amb fusteria exterior (Font: Elaboració pròpia)

En el termograma exposat, també s'observa la línia 1, la qual ens indica la zona corresponent a la ubicació dels radiadors, la qual es troba lleugerament a més temperatura. Si observem el gràfic següent podem comprovar que la temperatura és estable en tot el recorregut on es troben ubicats els radiadors:

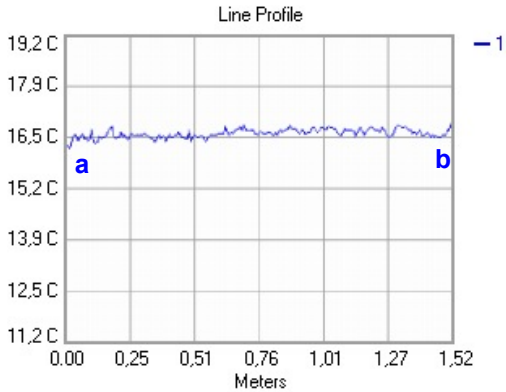


Figura 1.69: Gràfic del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D del termograma:

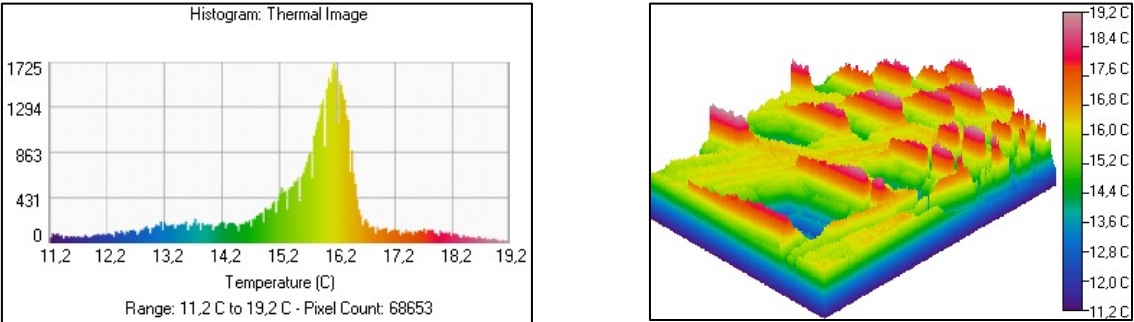
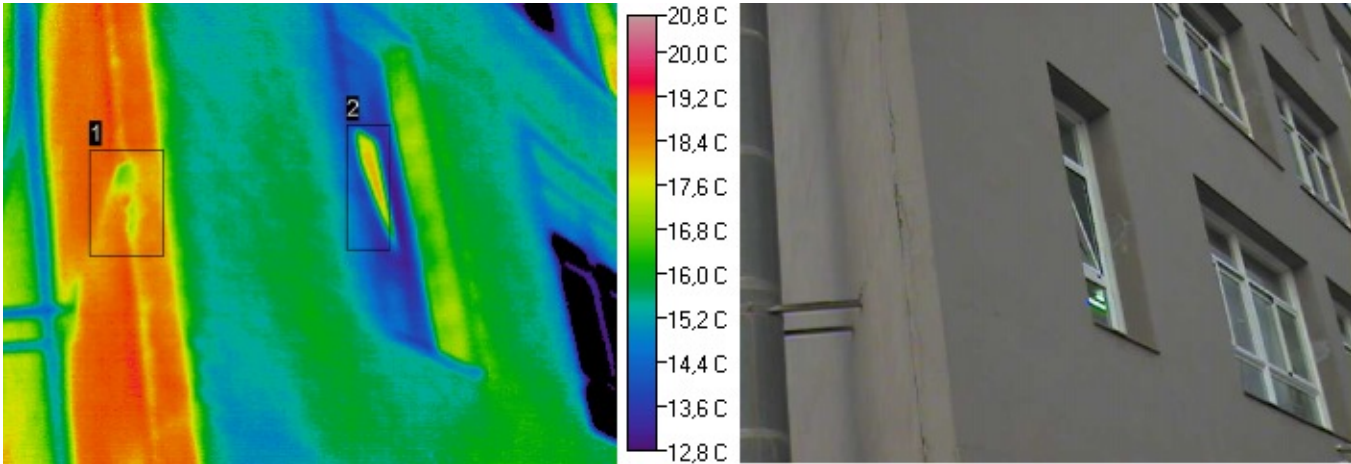
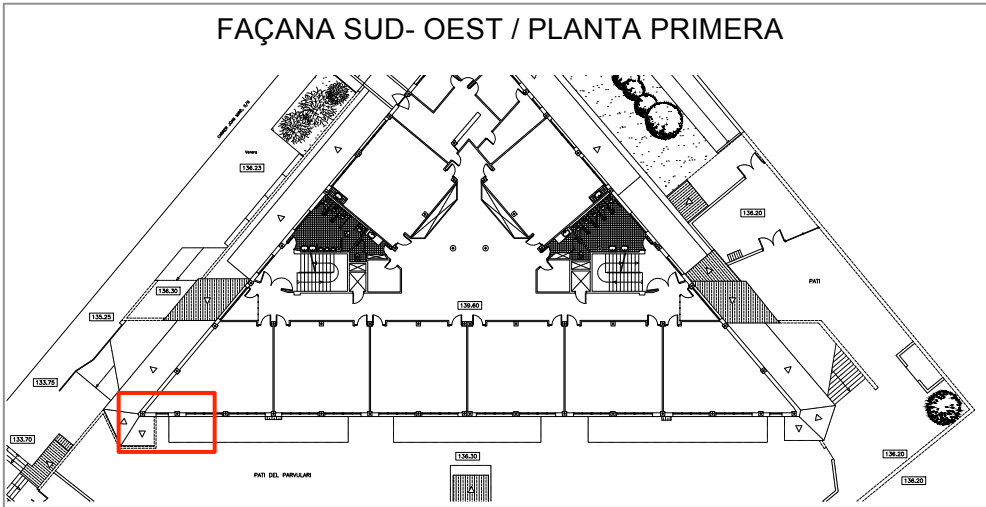


Figura 1.70: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 4:

- Ubicació:



Àrea	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	17 °C	19,7 °C	18,7 °C	0,93	12,9 °C	6 m	0,18m ² /3,01
2	13,1 °C	18,7 °C	15,2 °C	0,93	12,9 °C	6 m	0,08m ² /1,34

L'àrea analitzada del rectangle 1, ens indica una zona on la temperatura disminueix notablement arribant a 17 °C, a diferència de la resta de la façana la qual es troba a 19,7 °C. La temperatura de tot el parament, incloent aquesta zona, es troba a temperatura més elevada que la temperatura ambiental exterior de l'edifici. Amb això, podem concloure que s'estan produint pèrdues energètiques interiors cap a l'exterior a través del tancament de façana. Tot i això, si aprofundim més en l'anàlisi d'aquest termograma podem justificar que la temperatura d'aquesta façana Oest, correspon a la combinació de les pèrdues energètiques que es produeixen de l'interior, temperatura la qual es troba a 18 °C, amb la radiació solar rebuda per la façana Oest durant tota la tarda, ja que la presa del termograma es va realitzar a última hora de la tarda, i la façana encara estava irradiant l'energia rebuda. Donant èmfasi al punt a baixa temperatura de l'àrea 1, del qual s'ha fet referència anteriorment, correspon a una fissura

de la façana on hi ha humitat retinguda, i provoca una disminució de temperatura, la qual podem observar amb la càmera termogràfica. S'ha comprovat que per aquesta fissura també es produeixen pèrdues d'energia, ja que està a més temperatura que la temperatura ambiental exterior.

Continuant analitzant la façana Oest, cal remarcar que s'observa una discontinuïtat de temperatura (fi del color taronja), que correspon a l'ombra que provoca el tub d'extracció de fums, el qual es troba fixat a la façana.

L'àrea analitzada en el rectangle 2, correspon a una finestra oberta, on es produeixen pèrdues energètiques de l'interior de l'edifici. Amb aquesta imatge termogràfica es pot observar l'efecte que produeix deixar-se la finestra oberta, amb els equips de calefacció en funcionament.

A continuació, s'exposa un histograma on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels) i una imatge en 3D del termograma:

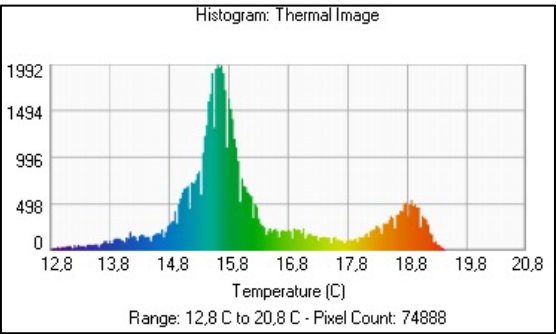


Figura 1.71: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

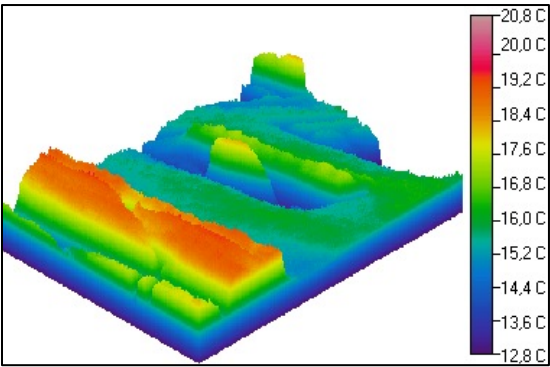
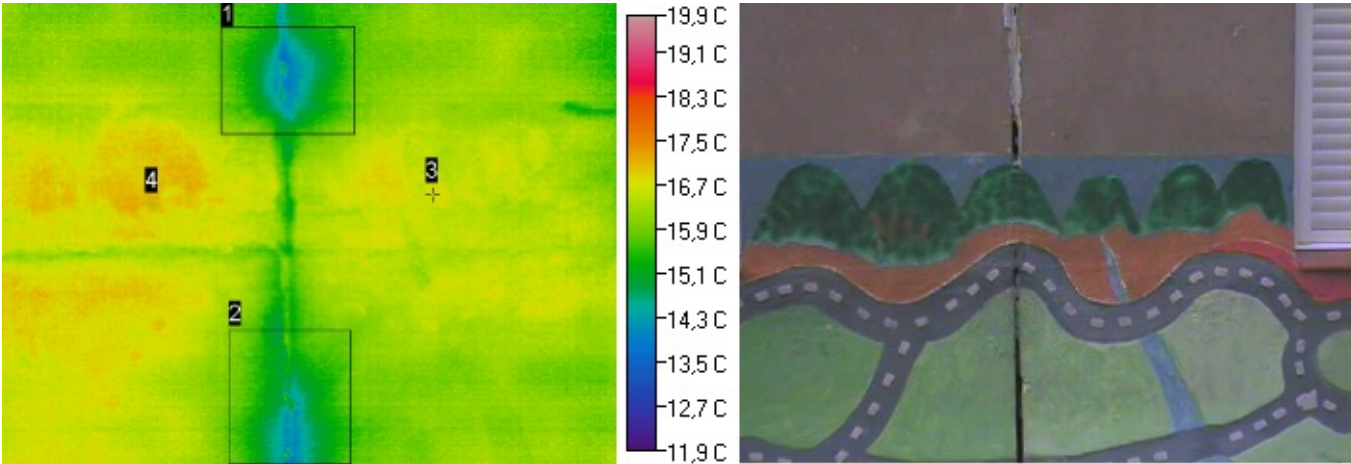
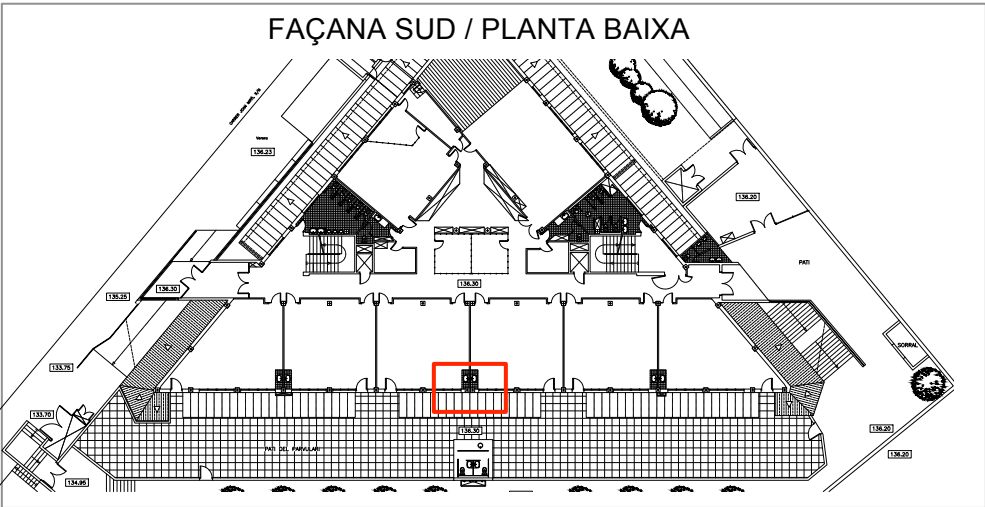


Figura 1.72: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 5:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	13,5 °C	16,7 °C	15,4 °C	0,93	13,3 °C	1,50 m	0,01m ² /0,22
2	13,8 °C	16,5 °C	15,5 °C	0,93	13,3 °C	1,50 m	0,01m ² /0,26
3	-	17,1 °C	-	0,93	13,3 °C	1,50 m	-
4	-	17,6 °C	-	0,93	13,3 °C	1,50 m	-

Durant l'estudi termogràfic de la façana Sud, vam comprovar que al parament existia una fissura important, on sospitàvem que suposaria un pont tèrmic important en l'edifici. La temperatura interior de l'edifici, concretament en aquesta zona era més elevada que la temperatura exterior de l'edifici. Un cop realitzat l'anàlisi del termograma amb el software corresponent, he pogut observar que aquesta fissura de la façana Sud es troba correctament segellada. Si observem el rectangle 1 i 2, podem comprovar que són dos punts on la temperatura és de 13,5 °C aproximadament, el que corrobora que no es produeixen pèrdues energètiques per aquest punt de la façana, ja que es troben a la mateixa

temperatura, que la temperatura ambiental exterior de 13,3 °C aproximadament. El punt 3 i 4, ens indiquen diferents temperatures a les quals es troba aquest parament, degut a la manca d'aïllament, que origina una irregularitat de temperatures en la façana.

A continuació, s'exposen dos histogrames corresponents als rectangles 1 i 2 on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), un histograma general de la imatge infraroja, i una imatge en 3D del termograma:

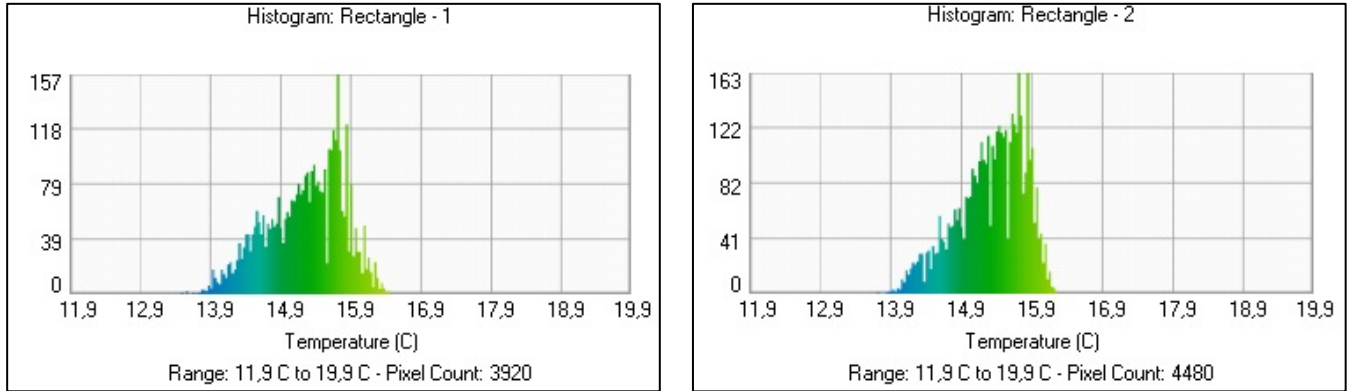


Figura 1.73: Histogrames de distribució de Temperatura del rectangle 1 i 2 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

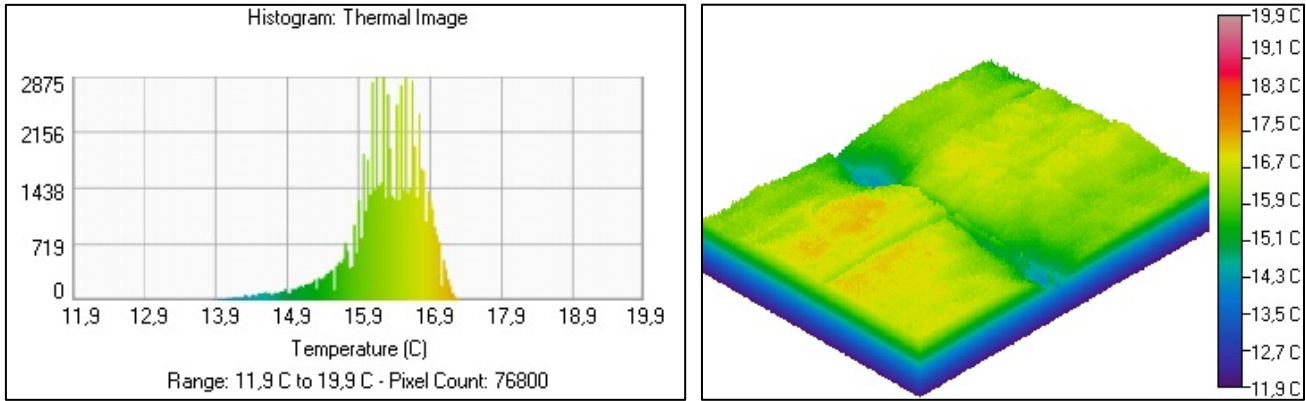
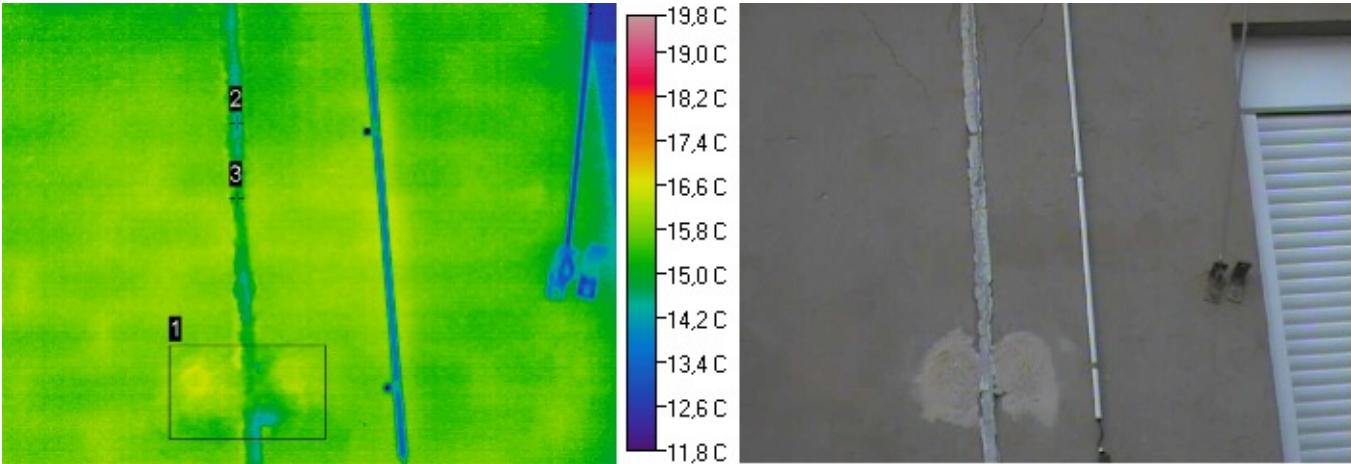
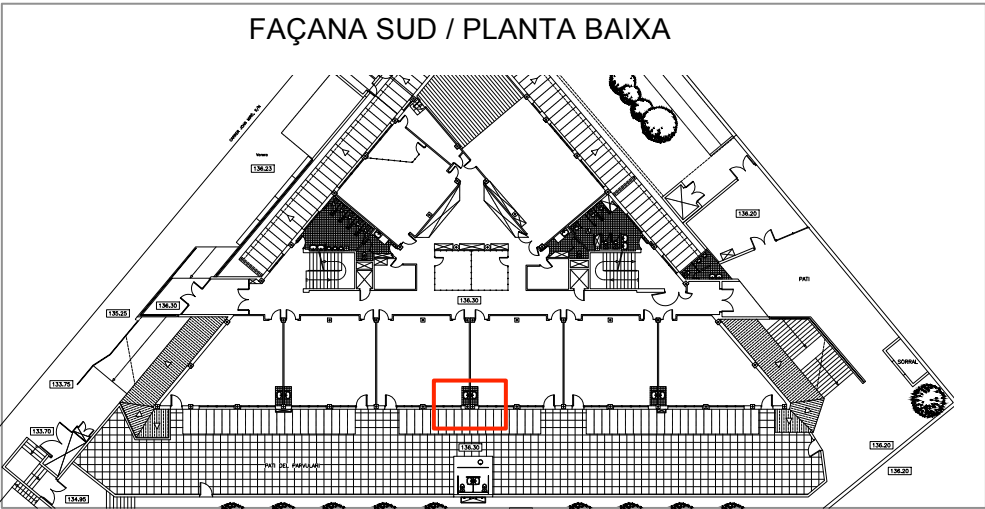


Figura 1.74: Histograma de distribució de Temperatura de la Imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 6:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	14,2 °C	17,1 °C	16 °C	0,93	13,3 °C	1,50 m	0,01 m²/0,30
2	-	14,5 °C	-	0,93	13,3 °C	1,50 m	-
3	-	15,2 °C	-	0,93	13,3 °C	1,50 m	-

Com es pot observar en aquesta imatge, ens trobem novament amb una altre fissura a la façana Sud, la qual interessa analitzar tèrmicament per comprovar si és una via de sortida d'energia. S'han col·locat diferents punts vers tota la fissura, per analitzar detalladament el comportament tèrmic d'aquesta, i constatar si es tracta d'un pont tèrmic a tenir present. Ens trobem a una temperatura ambiental de 13,3 °C aproximadament, i una temperatura interior de 17,5 °C. Observem que la temperatura dels punts 2 i 3 supera el valor de la temperatura ambiental, i podem entendre que es produeixen pèrdues energètiques mínimes per aquest punt crític. Tot i això, al tractar-se d'una diferència tan petita de

temperatura, entenem que existeix un marge d'error de mesura en el psicòmetre utilitzat, i s'arriba a la conclusió que la junta està ben segellada.

En contraposició, el rectangle 1 ens mostra una zona segellada, la qual es troba a més temperatura, i per on es produeixen pèrdues energètiques, ja que la temperatura interior la temperatura del parament, quasi bé estan equilibrades.

A continuació, s'exposen dos histogrames corresponents als rectangles 1 i a la imatge infraroja general on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D del termograma:

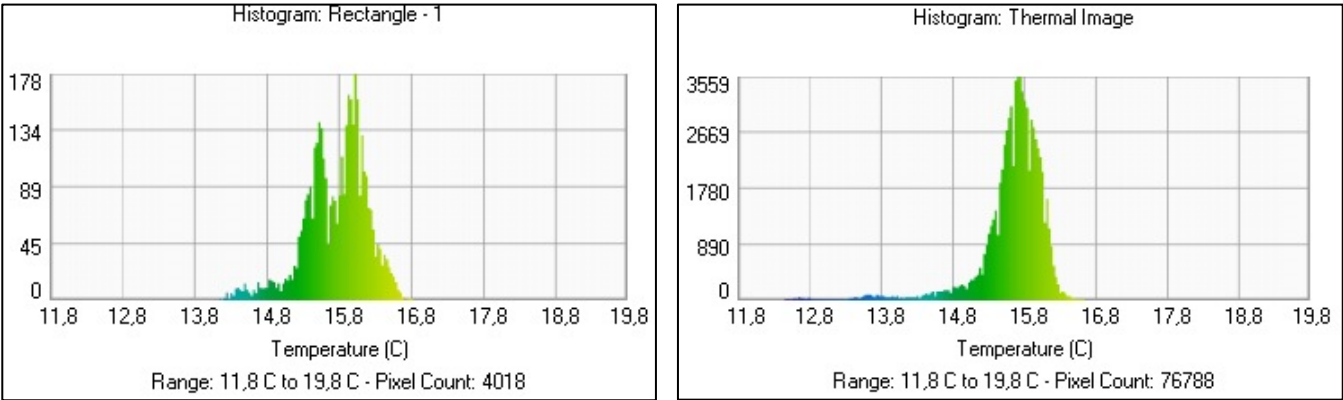


Figura 1.75: Histogrames de distribució de Temperatura del rectangle 1 i Imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

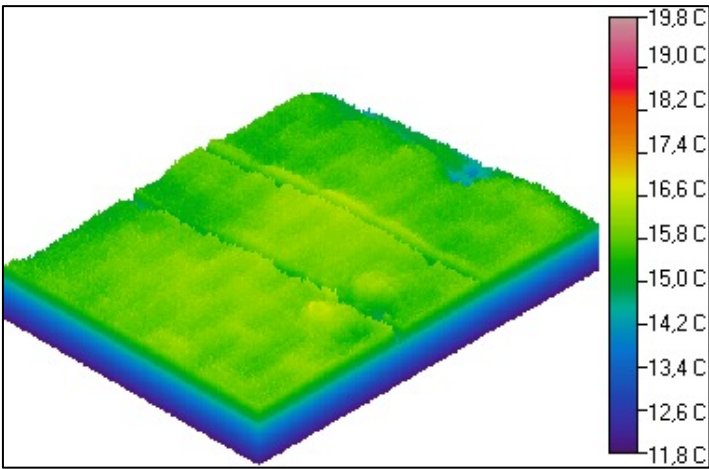
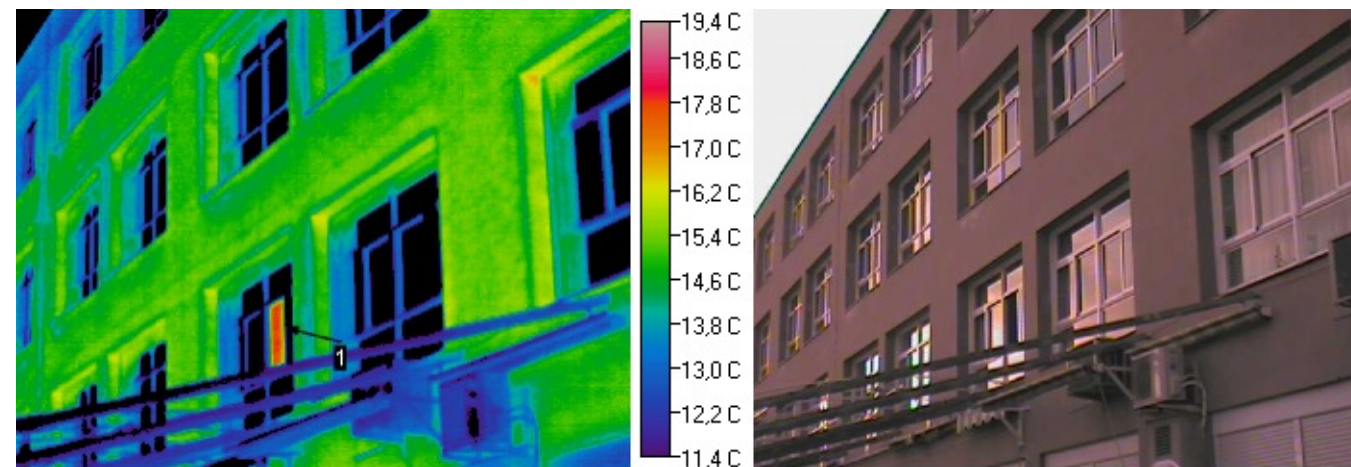
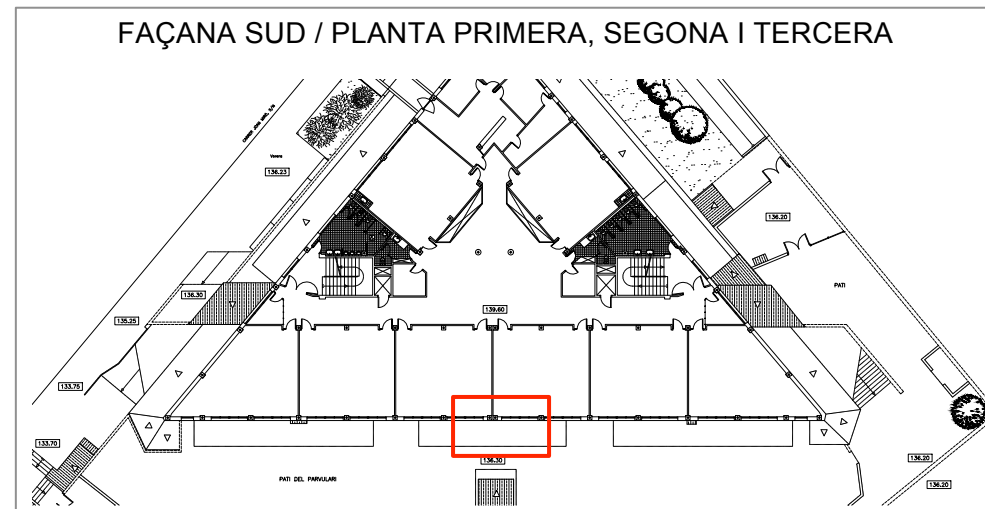


Figura 1.76: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 7:

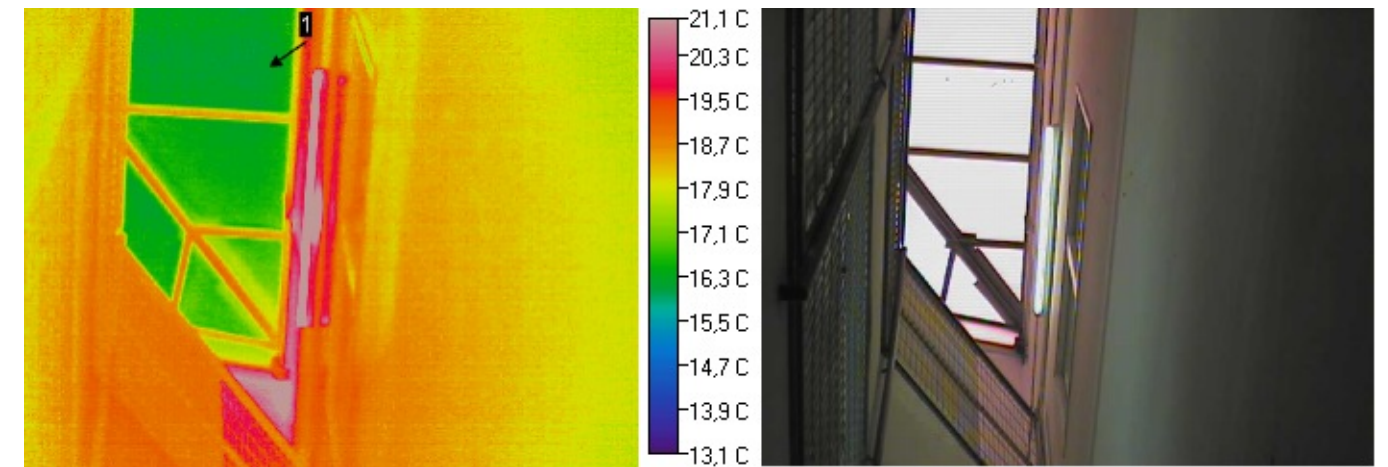
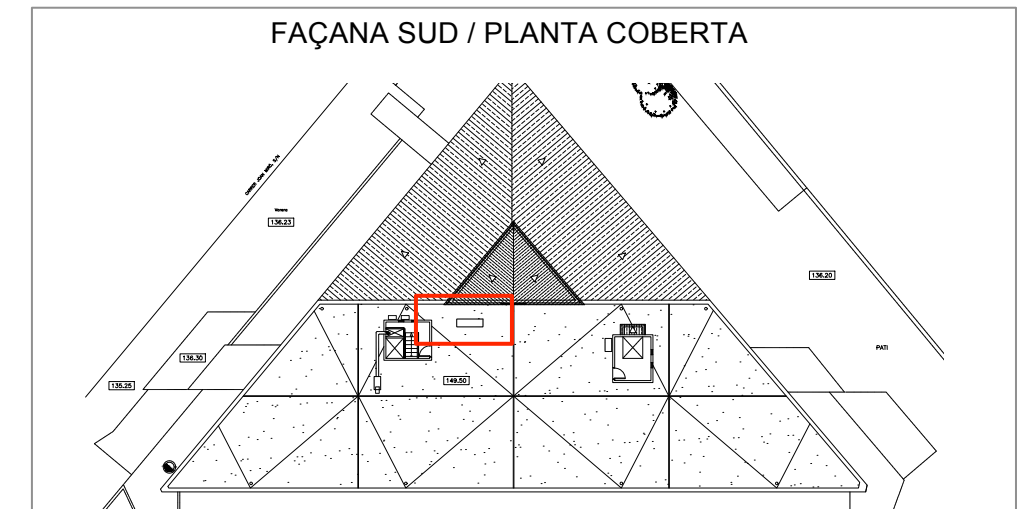
- Ubicació:



En aquesta imatge infraroja es pot visualitzar una finestra de la planta primera que es troba oberta, i per on es produeixen pèrdues energètiques de l'interior de l'edifici cap a l'exterior. Aquest fet, contribueix a reduir notablement el rendiment del sistema de calefacció de l'edifici, i conseqüentment a augmentar la demanda energètica de l'edifici.

TERMOGRAMA 8:

- Ubicació:

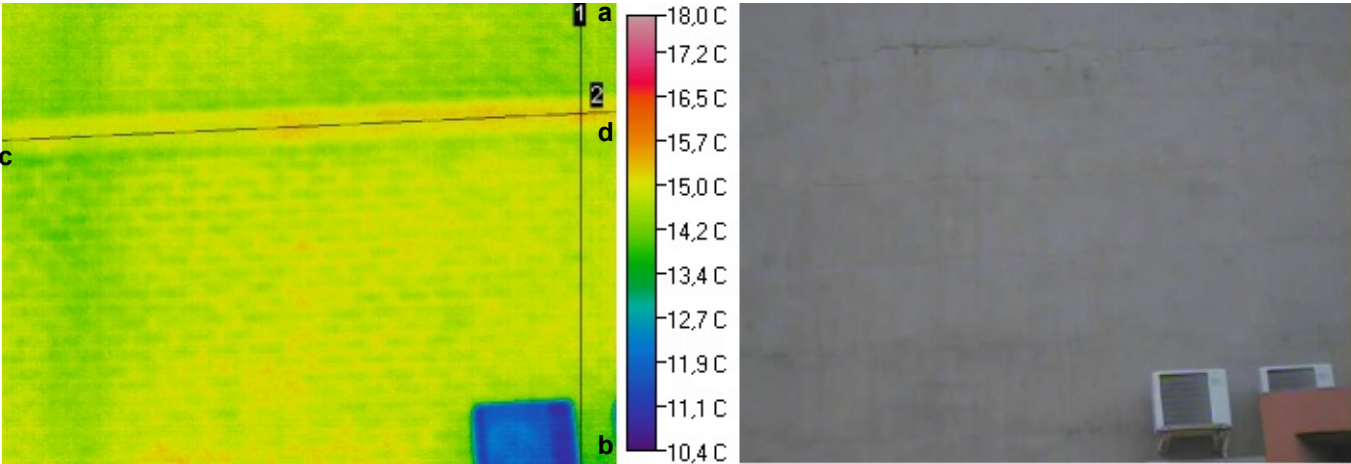
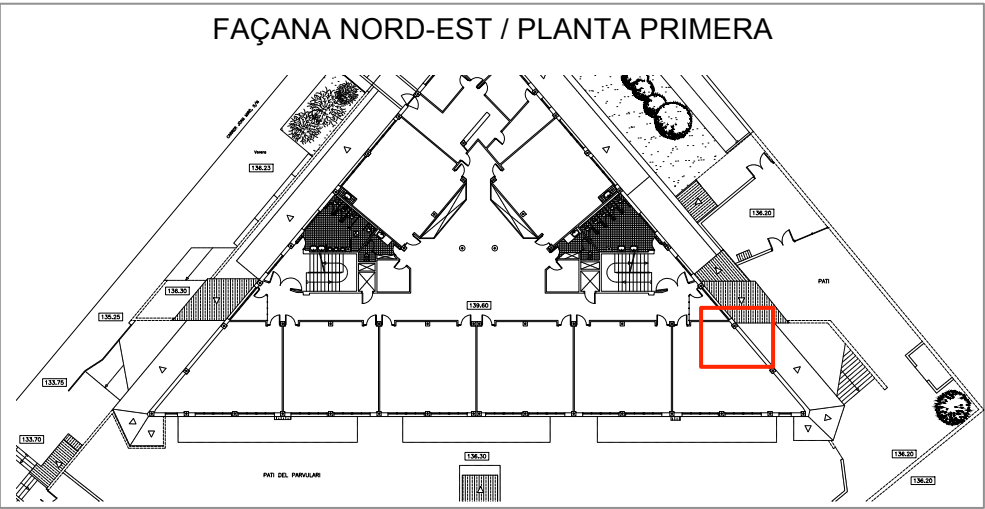


Aquest termograma s'ha realitzat des de l'interior de l'edifici. Es pretenia poder analitzar la claraboia que conforma una part del sostre de l'edifici, per veure si aquest canvi de material produeix pèrdues energètiques. En la imatge termogràfica es pot observar que la zona de vidre de la claraboia es troba a una temperatura de 16,3 °C, a diferència de les parets que es troben a una temperatura més elevada. S'arriba a la conclusió de que es necessitarà més quantitat d'energia per escalfar l'edifici, degut a que aquesta zona enviadriada genera un pont tèrmic important, suposant una via de sortida de la temperatura interior, i arribant a un equilibri tèrmic entre interior i exterior. Aquest pont tèrmic és degut a que es tracta d'un vidre senzill de 5 mm de gruix amb fusteria metàl·lica sense trencament de pont tèrmic.

La zona de màxima temperatura segons la paleta de colors, fa referència a un fluorescent encès, on els valors es troben en els màxims de temperatura.

TERMOGRAMA 9:

- Ubicació:



Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	13,3 °C	15,5 °C	14,7 °C	0,93	13,3 °C	7 m	2,01 m
2	14,6 °C	15,7 °C	15,2 °C	0,93	13,3 °C	7 m	2,80 m

Aquesta imatge termogràfica ens revela el sistema constructiu de la façana, ja que es poden observar els maons que conformen el tancament, els quals es troben sota una capa de morter monocapa, i que a simple vista no es poden veure, així com també es pot detectar el cantell del forjat corresponent al sostre de la planta primera. En referència al comportament tèrmic es pot observar que les juntes de morter entre maons i el cantell de forjat es troben a temperatura més elevada, amb lo que es genera un pont tèrmic entre juntes i en el front del forjat. Aquesta situació és deguda a l'absència d'aïllament tèrmic vers tot l'edifici.

A la imatge termogràfica, també es pot observar que la màquina condensadora d'aire condicionat està a una temperatura molt baixa, ja que actua com a evaporador a l'hivern, degut a que l'aparell està funcionant com a bomba de calor, i agafa l'aire fred exterior, per poder transformar-lo en aire calent.

A continuació s'exposen els gràfics de les línies 1 i 2 per visualitzar l'evolució de temperatures, això com una imatge en 3D del termograma:

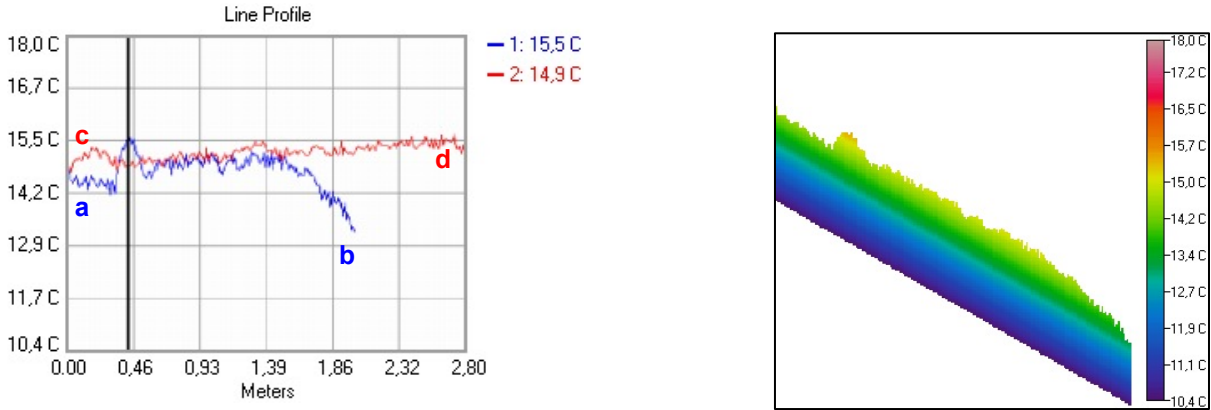


Figura 1.77: Gràfic línia 1 i 2, i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

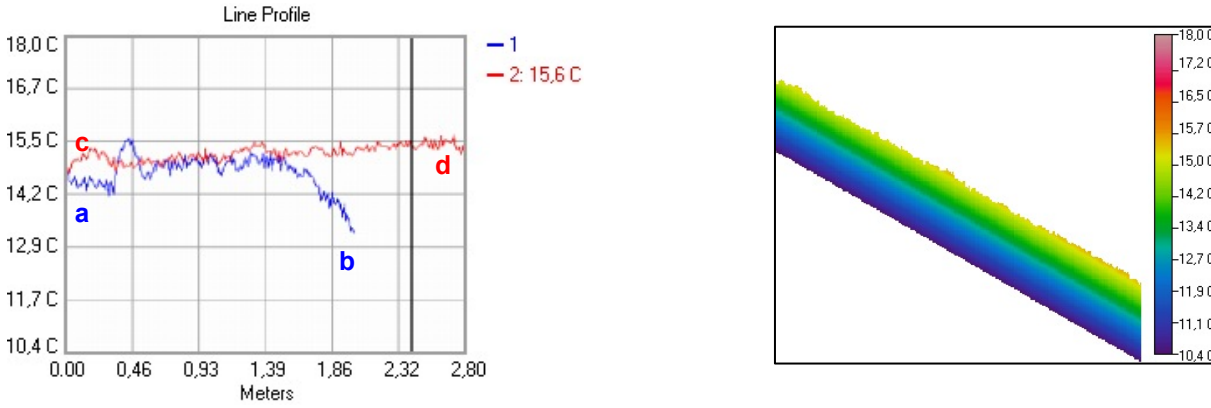


Figura 1.78: Gràfic línia 1 i 2, i perfil del comportament tèrmic línia 2 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

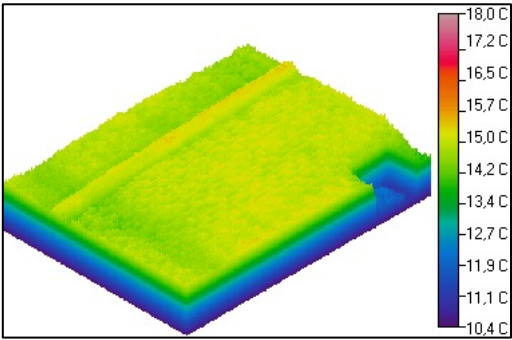
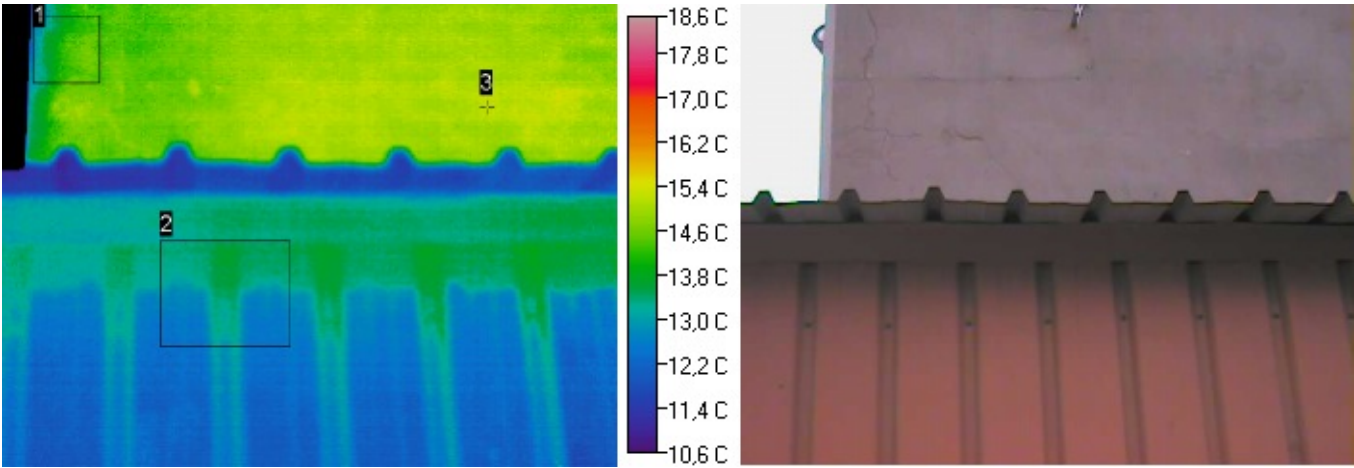
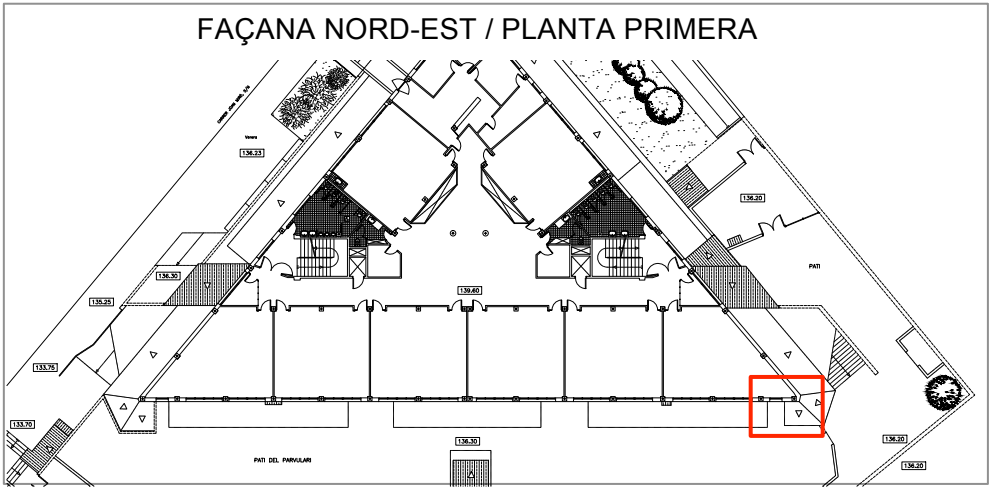


Figura 1.79: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 10:

- Ubicació:



Àrea/Punt	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	12,5 °C	15,1 °C	14,1 °C	0,93	13,3 °C	7,30 m	0,09 m²/0,53
2	9,3 °C	15,5 °C	12,6 °C	0,28	13,3 °C	7,30 m	0,29 m²/1,40
3	-	15,5 °C	-	0,93	13,3 °C	7,30 m	-

En aquesta imatge termogràfica es poden observar dos tipus de materials diferents. Un material que es tracta de morter de ciment monocapa que conforma la capa exterior de la façana principal de l'edifici, i un material de xapa, que conforma l'envolupant de l'aula de música.

Amb el termograma es poden observar diferents temperatures: la xapa d'acer es troba a 9,3 °C de temperatura mínima, mentre que la paret de façana de maó i morter es troba a 15,5 °C. En referència a la façana principal de l'edifici, es poden detectar dos colors diferents (verd i groc), on les juntes entre maons deixen escapar dèbilment la calor interior, degut a l'absència d'aïllament.

El revestiment d'una fulla de xapa, comporta un inconvenient considerable per poder escalfar aquesta zona de l'Escola a l'Hivern. Si observem detingudament la junta entre el parament vertical de xapa, i el

sostre de xapa observem que tenim una temperatura de 15,5 °C, mentre que la resta de parament es troba a temperatura inferior. Amb això es dedueix, que s'estan produint pèrdues d'energia per aquesta junta entre parament i coberta. La temperatura interior d'aquesta estància és de 16 °C, mentre que l'exterior és de 13,8 °C, suficient per veure el pont tèrmic existent. La temperatura interior d'aquesta zona de l'edifici és molt baixa, ja que ha estat calefactada només al matí, i com la xapa no ens aïlla de l'exterior i a més existeix aquest pot tèrmic en la junta, s'arriba fàcilment a un equilibri tèrmic entre interior i exterior.

A continuació, s'exposen dos histogrames corresponents als rectangles 1 i 2 on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D del termograma:

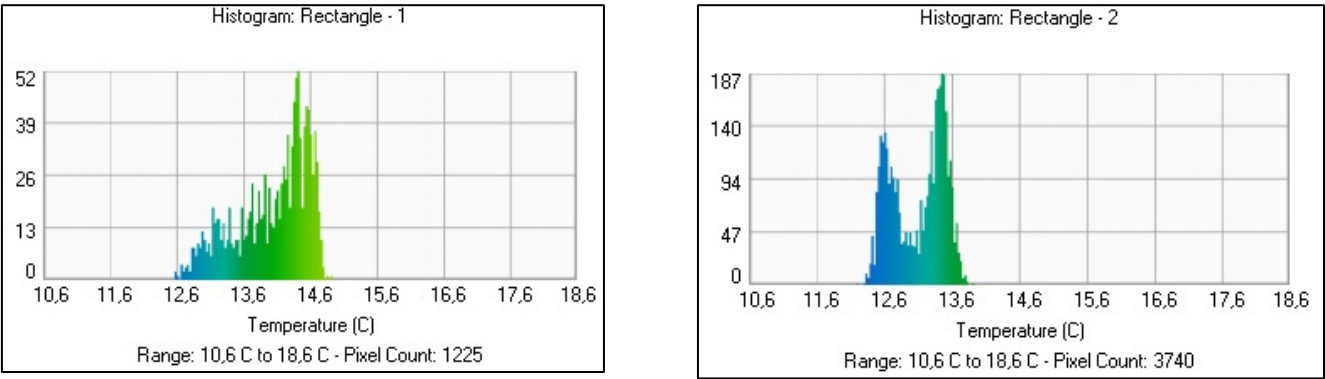


Figura 1.80: Histogrames de distribució de Temperatura del rectangle 1 i 2 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

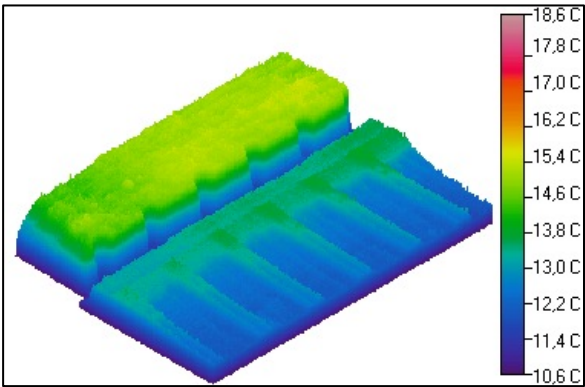
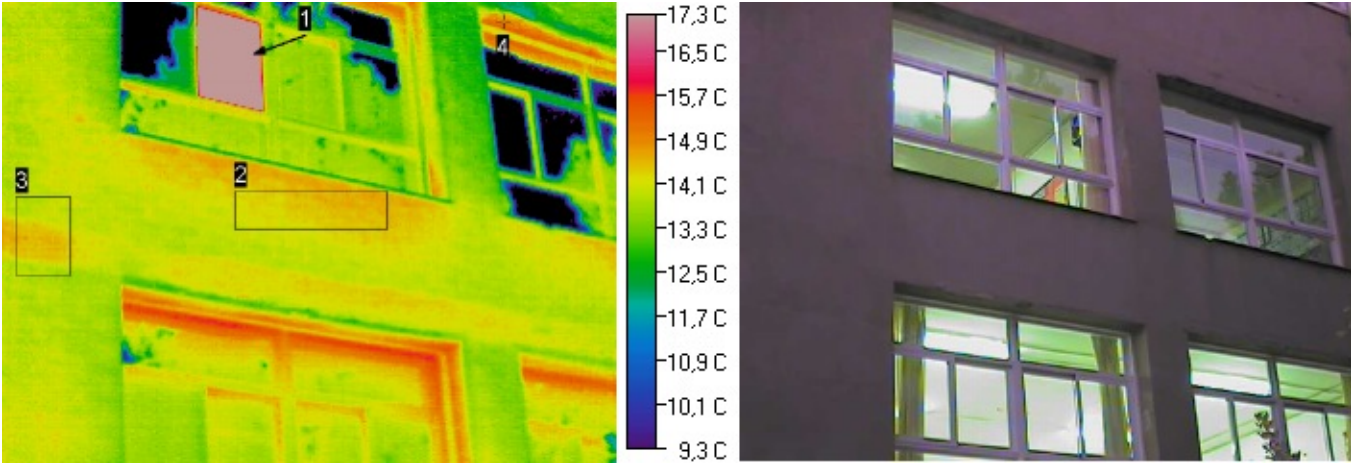
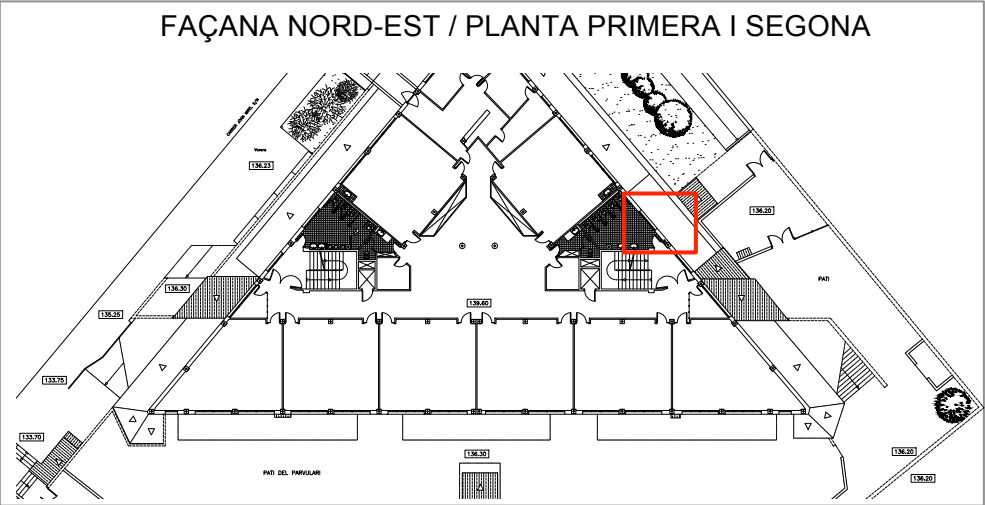


Figura 1.81: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 11:

- Ubicació:



Àrea/Punt	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
2	14 °C	15 °C	14,6 °C	0,93	12,8 °C	9 m	0,19 m² /2,55
3	13,6 °C	15,1 °C	14,4 °C	0,93	12,8 °C	9 m	0,14 m² /1,57
4	-	15,3 °C	-	0,93	12,8 °C	9 m	-

En la imatge infraroja exposada, la fletxa 1 ens indica una finestra oberta per on s'està escapant energia de l'interior. Aquesta aula ha estat calefactada durant tot el dia i utilitzada pels usuaris de l'escola, per aquest motiu la temperatura interior és més elevada. També podem observar el reflex dels arbres en els vidres, i que ens generen mesures confuses, de les quals no podem extreure conclusions. L'àrea 2 ens indica el pont tèrmic existent en l'ampit de la finestra. Ens trobem en una situació freqüent en la majoria d'edificis, ja que es tracta d'una solució constructiva incorrecta, present en quasi el 60 % d'edificis del parc edificatori. Existeix aquest pont tèrmic, ja que com s'ha exposat en el detall del

termograma 3 (el qual també hem pogut detectar en les finestres de la façana Sud) existeixen peces tallades en el pla del brancal (veure figura 1.72).

L'àrea 3 ens mostra el front del forjat, per on existeix un pont tèrmic discontinu degut a la incorrecta solució constructiva. A continuació s'exposa el detall on es pot observar clarament aquesta deficient solució constructiva, la qual genera un pont tèrmic important.

El punt 4 fa referència a les llindes de les finestres per on existeix un pont tèrmic evident. En aquest cas no existeix caixa de persiana, ja que aquestes finestres no estan dotades d'aquest element de protecció, però es crea un pont tèrmic degut al contacte de la paret exterior amb la paret interior per la capa estanca. Aquest pont tèrmic és comú en les façanes amb càmera d'aire.

A continuació, s'exposen dos histogrames corresponents als rectangles 2 i 3 on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), un histograma de la imatge infraroja i una imatge en 3D del termograma:

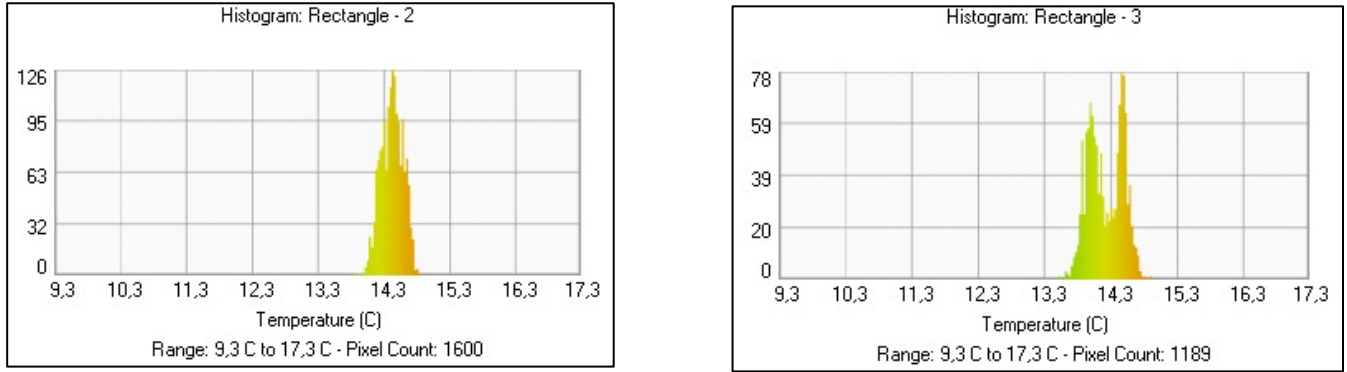


Figura 1.82: Histogrames de distribució de Temperatura del rectangle 2 i 3 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

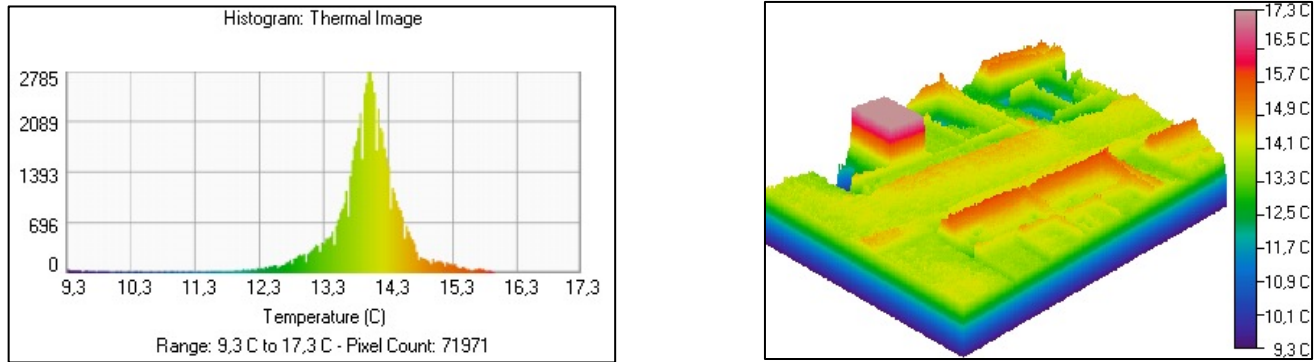
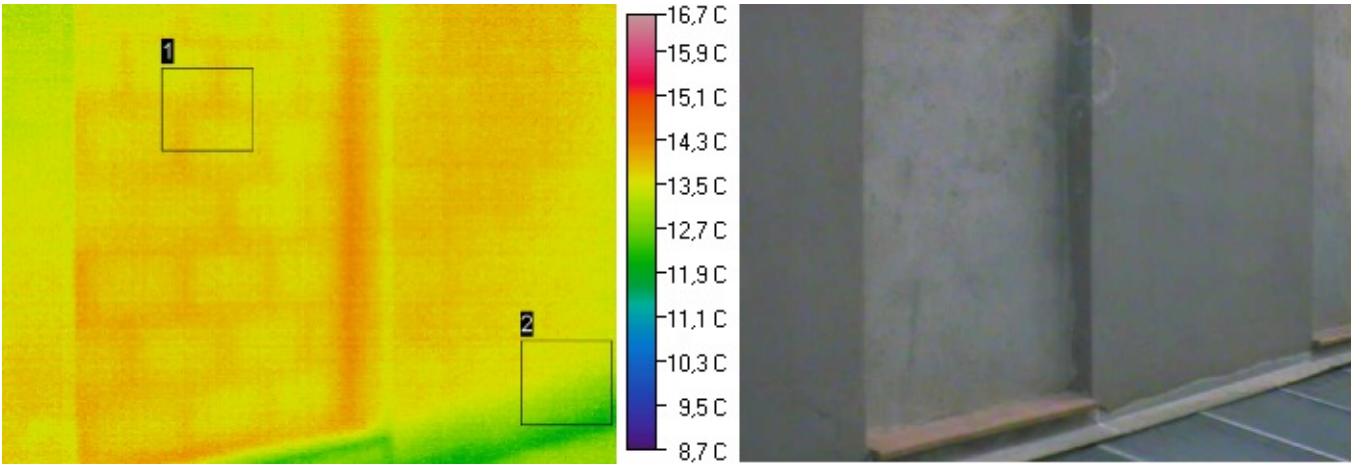
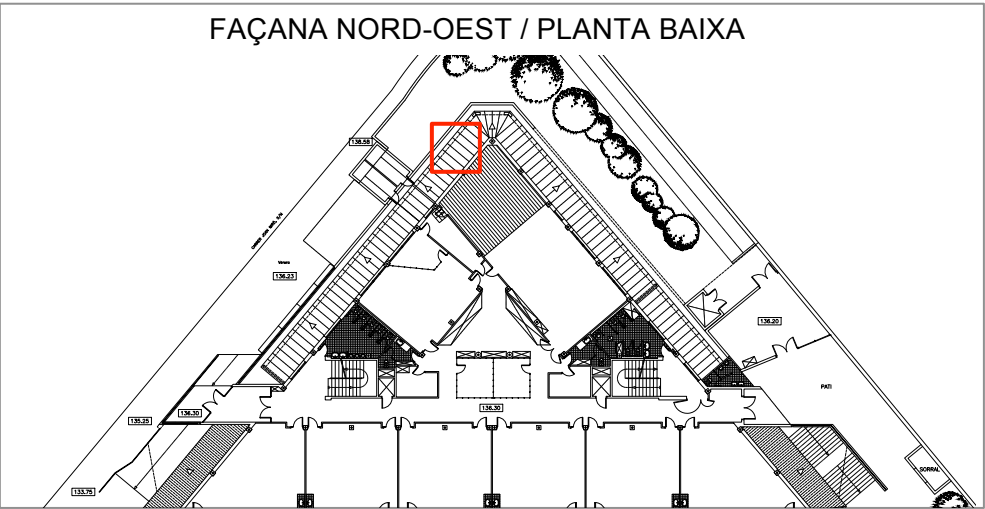


Figura 1.83: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 12:

- Ubicació:



Àrea	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	13,5 °C	14,4 °C	13,9 °C	0,93	12,2 °C	2,50 m	0,02m²/0,26
2	11,9 °C	14,1 °C	13,3 °C	0,93	12,2 °C	2,50 m	0,02m²/0,16

En aquesta imatge termogràfica es poden observar els maons que conformen un entrant de la paret de façana, els quals no es poden veure a simple vista, ja que l'acabat del tancament es compon d'una capa de morter monocapa. Es dedueix que es tracta d'una finestra tapiada, ja que en la zona inferior de l'element existeix un escopidor. Gràcies als raigs infrarojos podem veure que les juntes entre maons i els brancals de la finestra es troben a una temperatura més elevada (exactament a 14,4 °C), que la resta del tancament i per on es produeixen de forma dèbil pèrdues energètiques (arribem a aquesta conclusió ja que la temperatura interior de l'edifici és de 17 °C i la temperatura exterior ambiental és de 12,2 °C). El pont tèrmic que es detecta entre les juntes de la fàbrica de maó és degut a la manca d'aïllament en el parament de façana; en canvi les pèrdues energètiques que es produeixen pels

brancals de la finestra, són un punt crític a tractar en aquesta edificació, i un pont tèrmic comú en la majoria d'immobles, degut a una incorrecta solució constructiva que generalment es realitza i que s'ha explicat anteriorment.

L'àrea 2 ens indica la zona inferior del parament en la trobada amb la claraboia que conforma el sostre de la planta soterrani, on la temperatura disminueix notablement ja que es tracta d'un punt fred de l'edifici, on durant el dia l'arbrat del davant produeix ombra i emergeixen humitats. Es tracten d'humitats per condensació, ja que el vapor d'aigua de l'ambient, ha condensat sobre l'exterior del parament. També deduïm que la pluja contribueix en l'aparició d'aquestes humitats, degut a les filtracions que es produeixen en dies plujosos on l'aigua es queda estancada en la trobada d'aquests dos elements.

A continuació, s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D del termograma:

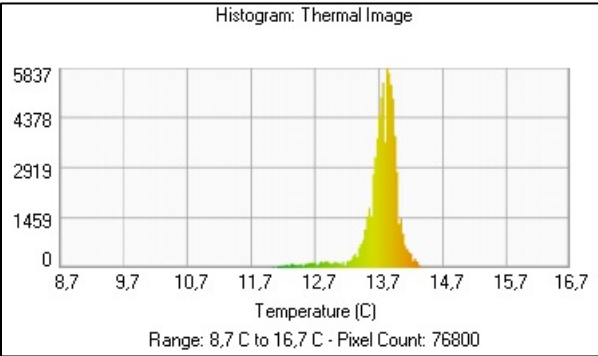


Figura 1.84: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

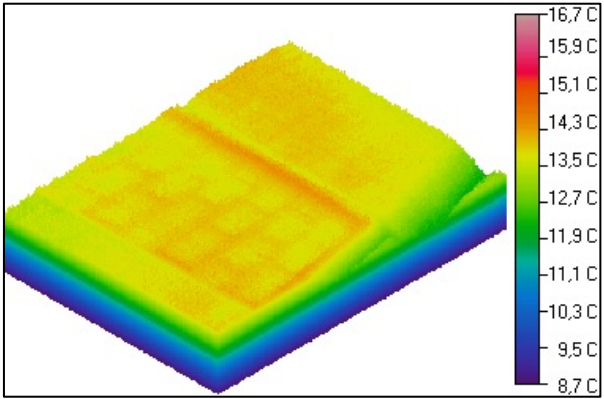
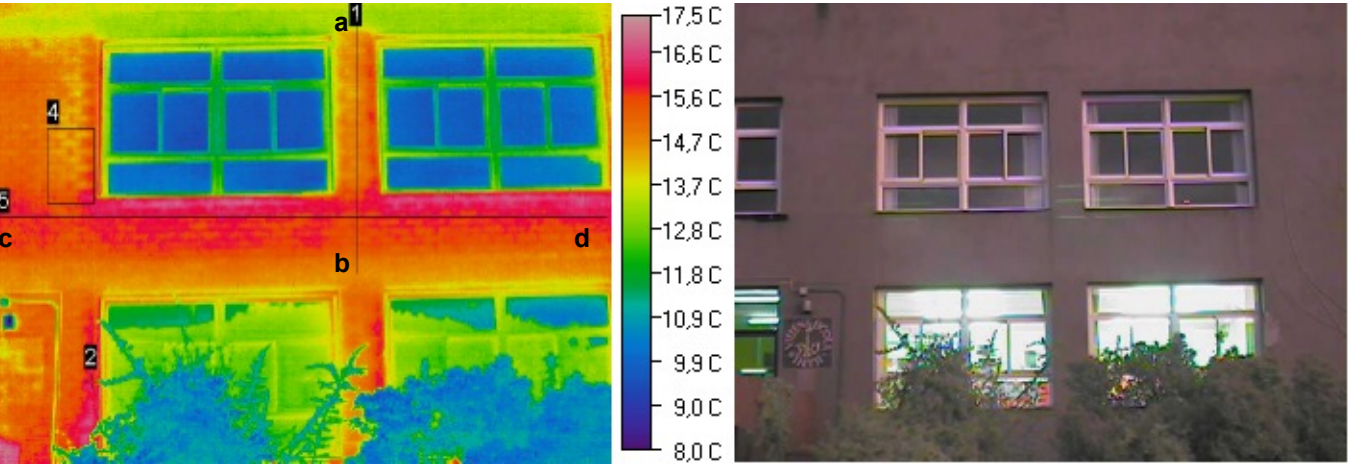
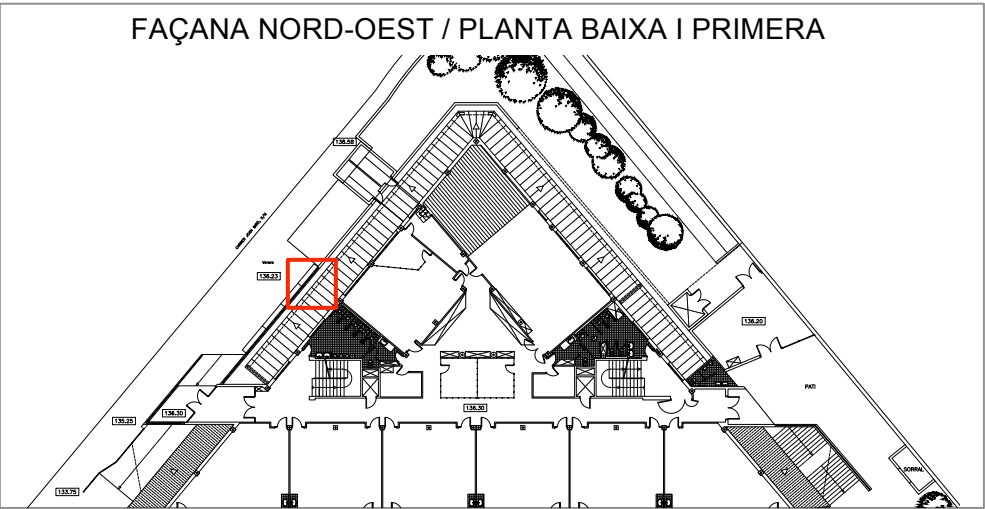


Figura 1.85: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 13:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	13,5 °C	16,3 °C	15,2 °C	0,93	12 °C	9 m	1,44 m
2	-	16,5 °C	-	0,93	12 °C	9 m	-
4	14,4 °C	16,9 °C	15,3 °C	0,93	12 °C	9 m	0,11m ² /2,92
5	15,7 °C	16,7 °C	16,2 °C	0,93	12 °C	9 m	3,43 m

En aquesta imatge termogràfica es pot observar la situació dels radiadors que es troben ubicats en la part interior de l'edifici, i els quals estan en funcionament. Això ho podem deduir ja que si observem la línia 5, ens mostra una zona de la façana que es troba a elevada temperatura, coincidint exactament amb la situació dels sistemes de calefacció.

Amb la línia 1 es vol veure com evoluciona la temperatura en la façana que conforma tota la planta primera.

En el punt 2, podem observar una zona amb augment de temperatura, degut a la manca d'aïllament en tot el mur exterior.

L'àrea 4, ens indica la irregularitat de temperatures que es produeix en el mur exterior, i com a partir de la imatge infraroja es poden detectar els maons que conformen la obra de fàbrica de la façana.

En aquest termograma també es poden veure com els perfils de la fusteria estan més freds, i per on no es produeixen pèrdues energètiques, ja que es tracta d'una fusteria metàl·lica amb trencament de pont tèrmic.

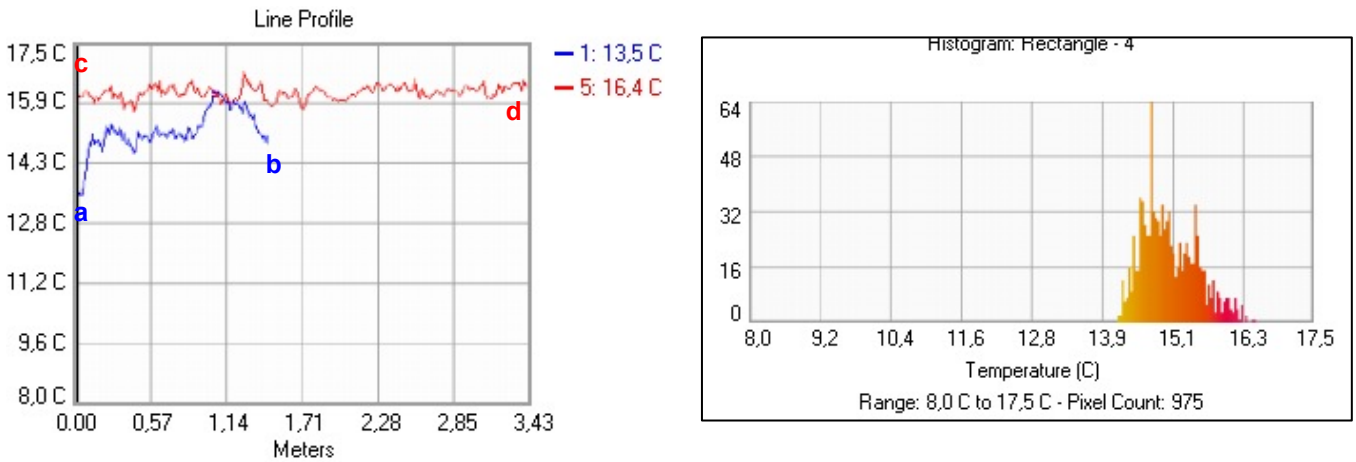


Figura 1.86: Gràfic línia 1 i 5, i Histograma del rectangle 4 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

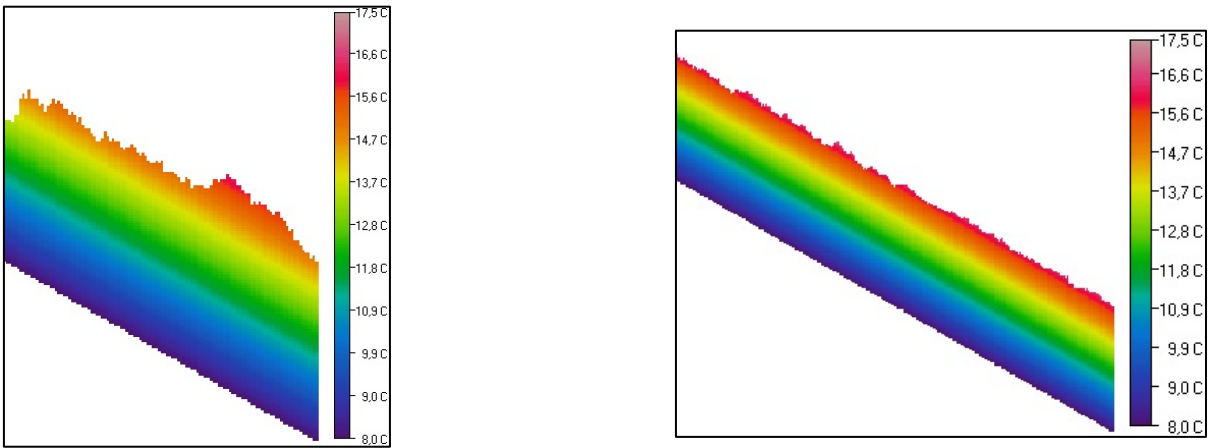
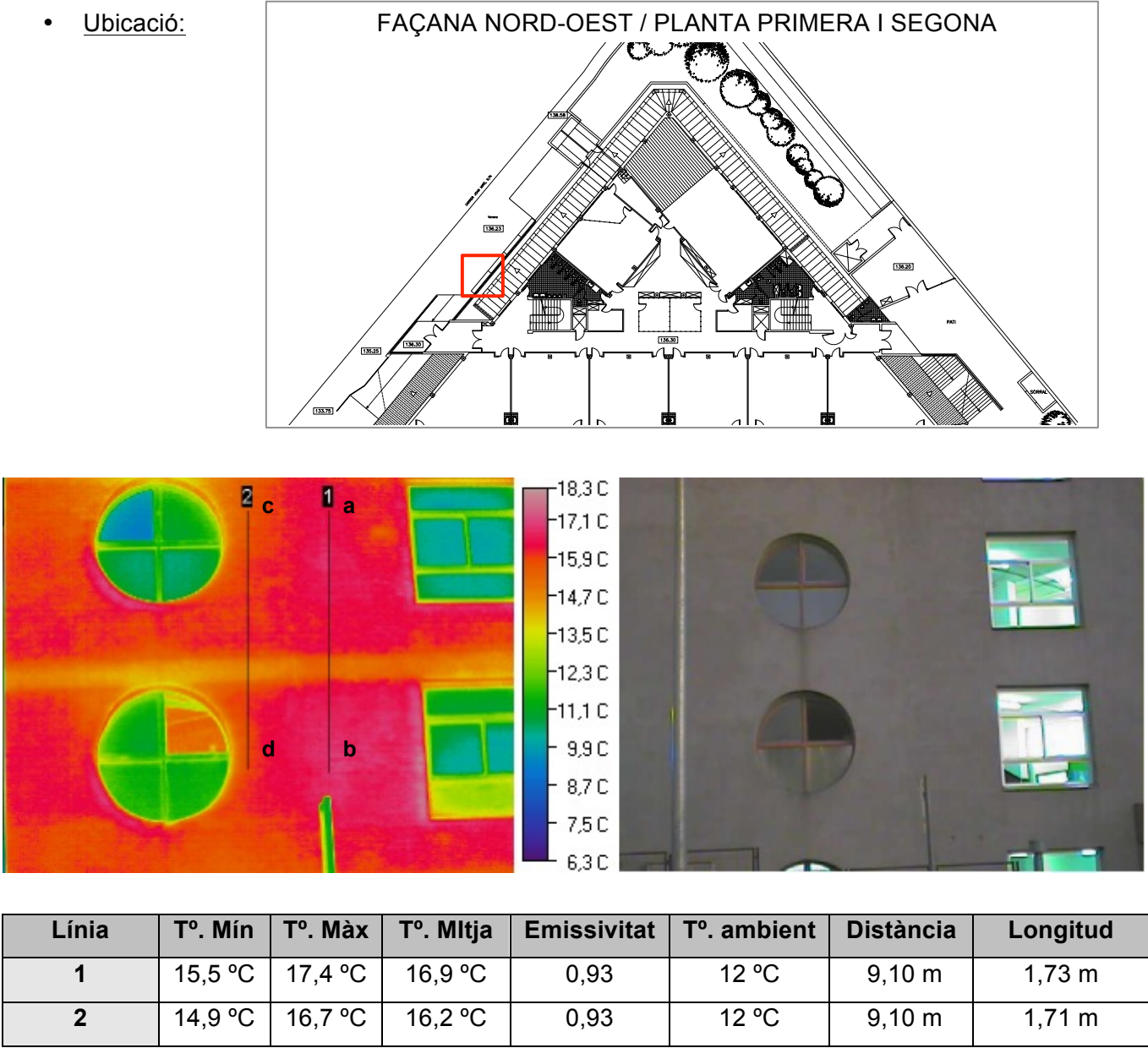


Figura 1.87: Perfils del comportament tèrmic línia 1 i 5 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II).

TERMOGRAMA 14:



En aquest termograma es pot visualitzar que la temperatura de la façana Nord-Oest és elevada a causa de la radiació solar absorbida durant les hores de la tarda, en combinació amb els radiadors que es troben encesos en totes les aules d'aquesta façana. En aquesta imatge es detecta el forjat superior de la planta primera, el qual es troba a temperatura inferior que la resta de la façana. Si analitzem les diferents temperatures mesurades amb el psicròmetre, obtenim que la temperatura interior d'aquesta part de l'edifici és de 20 °C, i la temperatura exterior és de 12 °C, mentre que la temperatura del parament és de 17,4 °C en la línia 1. Podem concloure que s'estan produint pèrdues energètiques importants pel parament degut a la manca d'aïllament, i per tant, es tracta d'un pont tèrmic a tenir present. En referència al cantell del forjat, el qual es troba a temperatura inferior, cal mencionar que

també s'estan produint dissipacions energètiques, ja que un cop analitzada la imatge termogràfica observem que la temperatura en aquest punt és de 16,9 °C, mentre que la temperatura exterior és de 12 °C, però de manera més dèbil ja que l'energia calorífica triga més en arribar al cantell del forjat, degut a les diferents seccions dels elements per les quals ha de passar (forjat + façana). A continuació s'exposa un esquema on s'observa el recorregut que ha de realitzar l'energia des de l'interior fins al cantell del forjat, motiu pel qual es troba a temperatura inferior que la resta de la façana, on la secció és més petita. També es presenta un gràfic amb el recorregut de les línies 1 i 2, per poder visualitzar amb claredat el salt tèrmic que es produeix en la façana d'una planta a una altre:

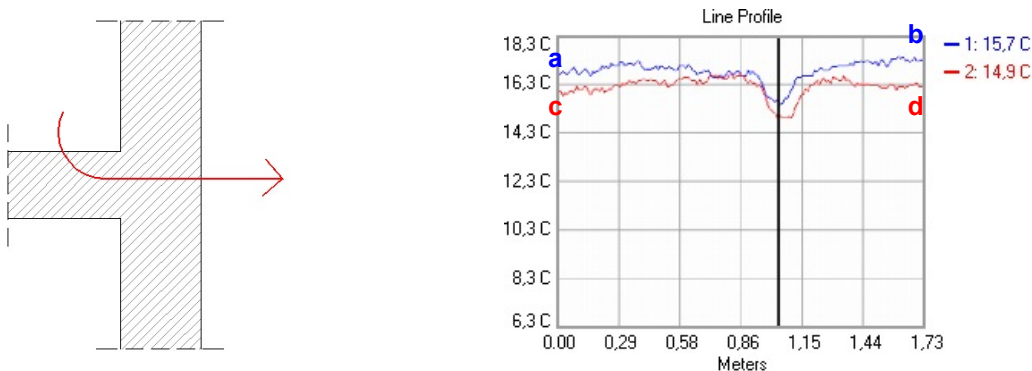


Figura 1.88: Esquema recorregut energia i gràfic del comportament tèrmic línia 1 i 2 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

En la imatge digital podem comprovar que existeix un vidre trencat, i amb la imatge infraroja detectem que s'estan produint pèrdues energètiques. Aquest defecte contribueix a reduir els funcionament dels sistemes de calefacció i conseqüentment, a augmentar la demanda energètica. També observem ponts tèrmics per la fusteria de les finestres, ja que tal i com s'ha exposat en la introducció de l'edifici, en aquesta façana trobem fusteria de fusta i PVC sense trencament de pont tèrmic. En relació als vidres, no podem valorar la seva temperatura, ja que existeixen reflexes que dificulten els resultats, però cal destacar que es tracten de vidres senzills de 5 mm de gruix sense càmera. A continuació, s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels):

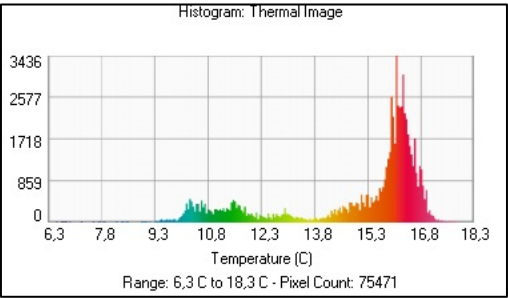
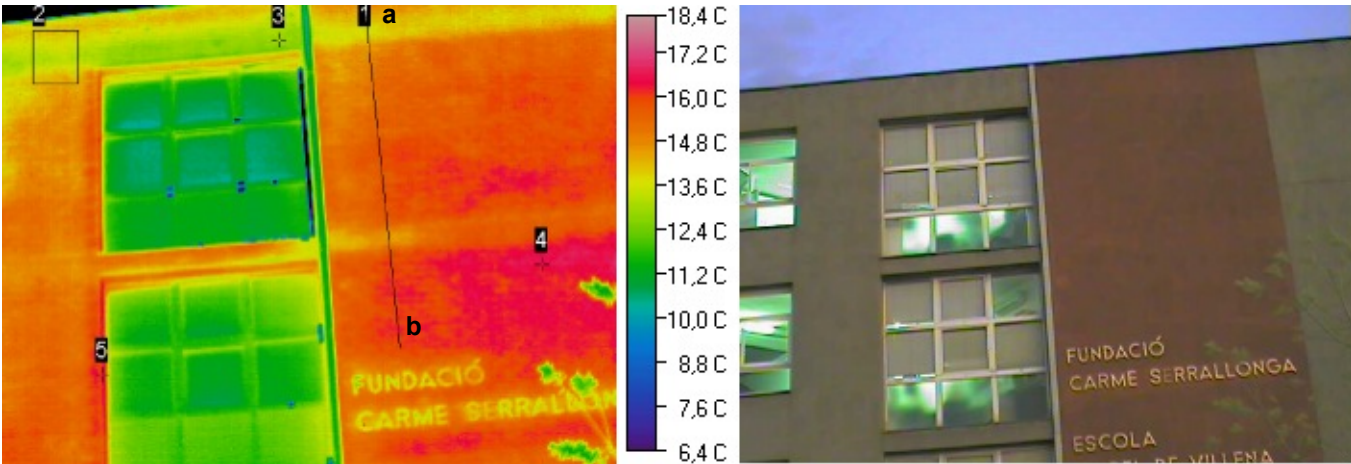
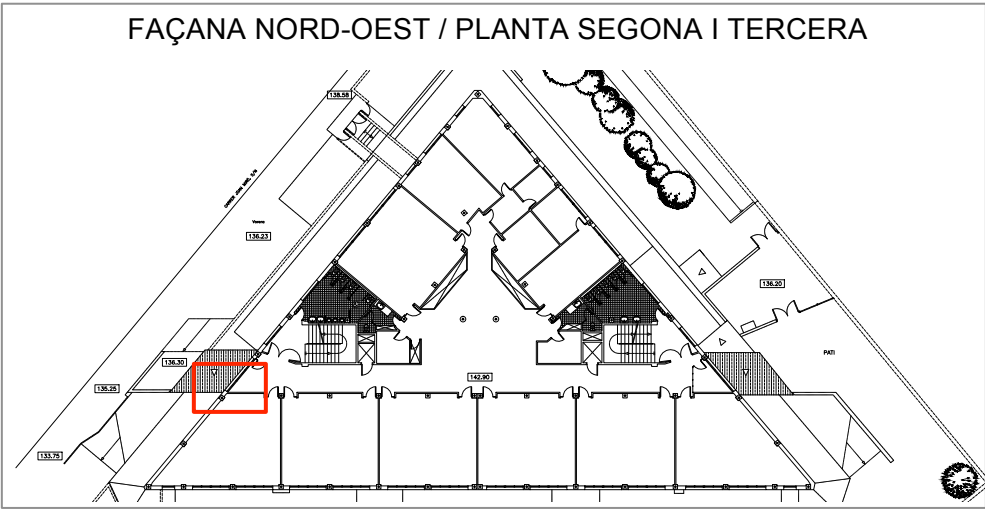


Figura 1.89: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 15:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	13,9 °C	16,7 °C	15,8 °C	0,93	12 °C	10 m	2,10 m
2	13,1 °C	14,8 °C	14 °C	0,93	12 °C	10 m	0,10m ² /1,44
3	-	13,1 °C	-	0,93	12 °C	10 m	-
4	-	17 °C	-	0,93	12 °C	10 m	-
5	-	17,9 °C	-	0,77	12 °C	10 m	-

En aquest termograma referent a una part de la façana Nord-Oest també podem observar irregularitat de temperatures degut a la manca d'aïllament en tot el parament. La línia 1 ens indica que en aquesta zona de la façana també existeix el mateix fet que s'ha analitzat anteriorment, on els cantells dels forjats es troben a menys temperatura que la resta de façana, però per on també s'estan generant pèrdues energètiques.

Per poder observar l'evolució de temperatures de la línia 1, així com aquest descens de temperatura coincidint amb el pas dels forjats, a continuació es presenta un gràfic i el perfil de temperatures:

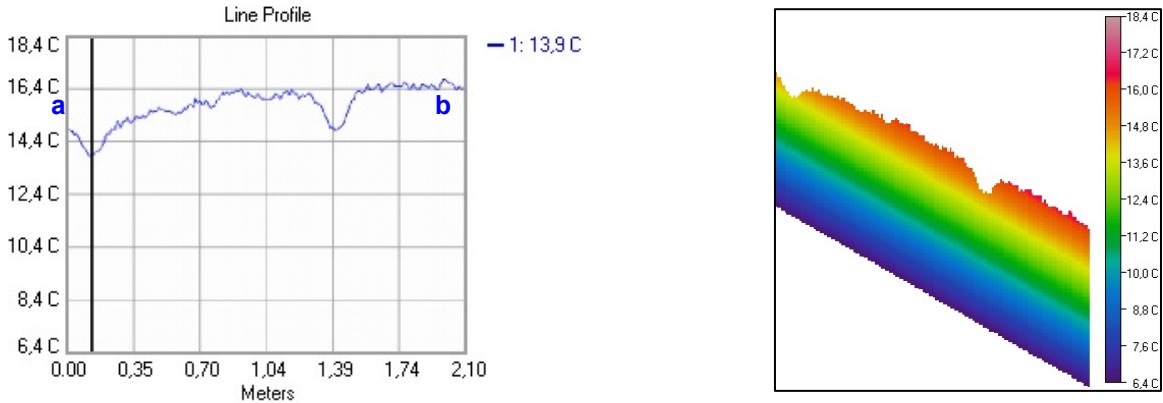


Figura 1.90: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

L'àrea 2 i el punt 3 ens indiquen el cantell del forjat de la coberta, el qual es troba en contacte amb l'exterior, i per aquest motiu té una temperatura inferior a la resta de la façana, però es continuen produint pèrdues energètiques, ja que la temperatura exterior és de 12 °C, mentre que la temperatura en aquests punts és de 13,1 °C.

El punt 4 ens assenyala una part de la façana on la temperatura és màxima, i per on s'estan produint dissipacions d'energia importants. Aquest augment de temperatura és degut a que l'aula interior està destinada al laboratori de ciències naturals on trobem aparells que dissipen calor, i conseqüentment augmenta la temperatura interior de l'aula, deixant entreveure aquest fet en el parament exterior de façana, per on s'està escapant tota la calor interior, degut a l'absència d'aïllament.

A continuació, s'exposa un histograma de la imatge infraroja on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D del termograma:

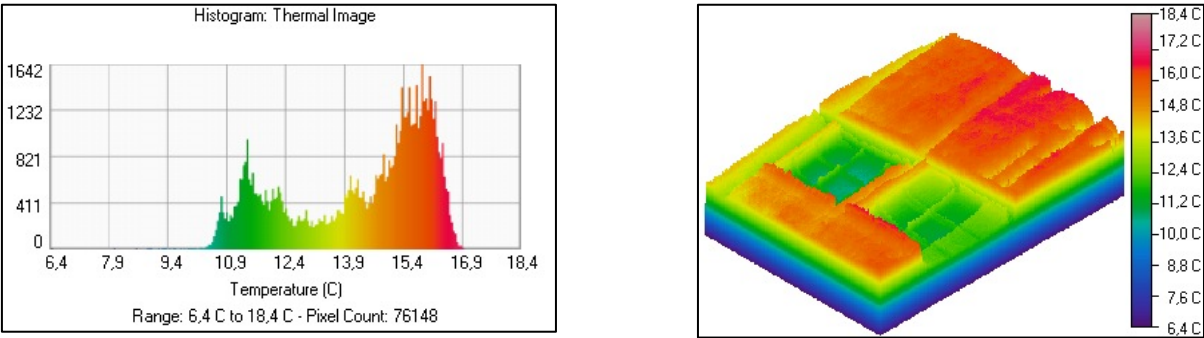
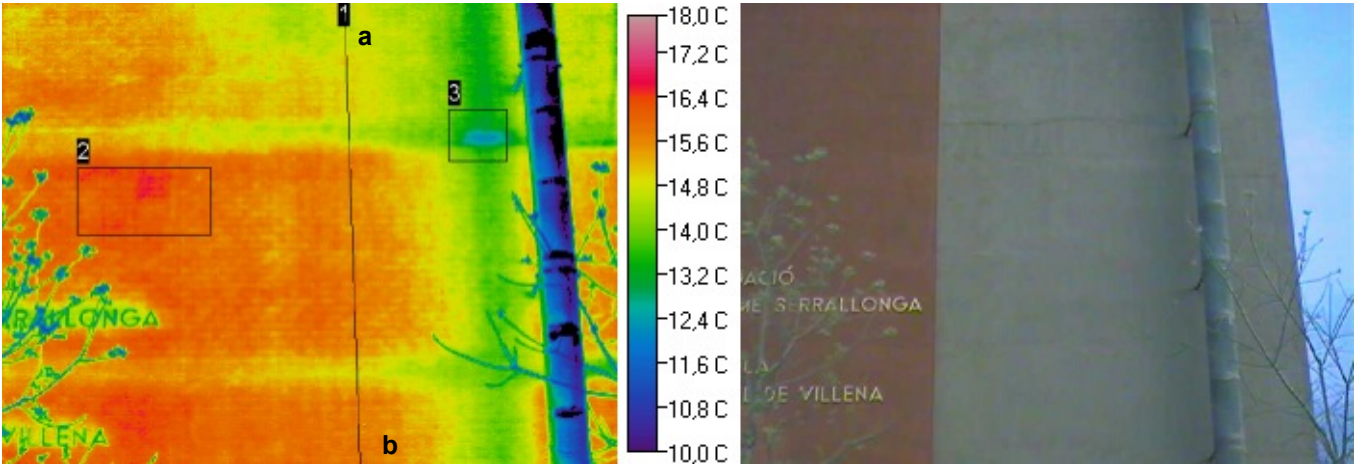
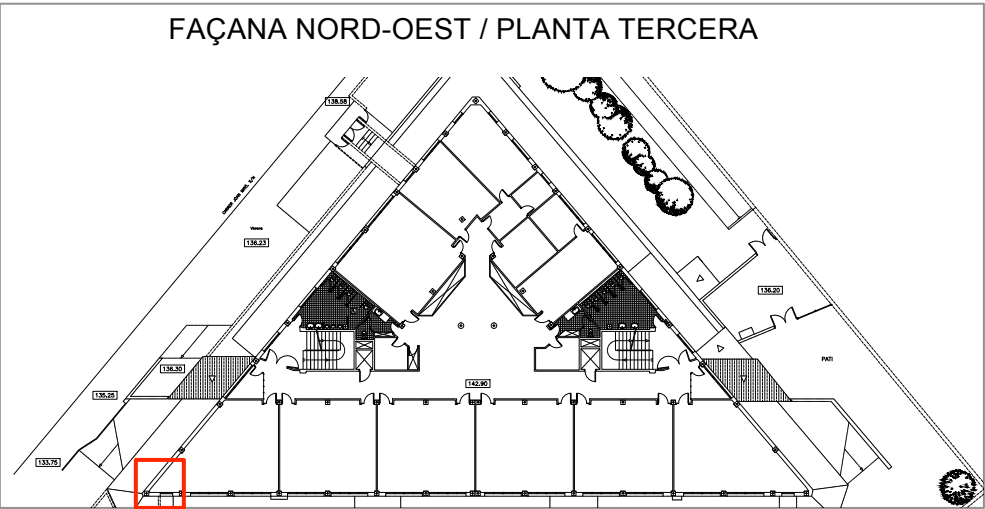


Figura 1.91: Histograma de distribució de Temperatura de la Imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 16:

- Ubicació:



Àrea/Línia	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts Longitud
1	14,7 °C	16,3 °C	15,7 °C	0,93	12 °C	15 m	4,20 m
2	15,7 °C	17,3 °C	16,5 °C	0,93	12 °C	15 m	0,79m ² /27,76
3	12,2 °C	14,8 °C	13,5 °C	0,93	12 °C	15 m	0,27m ² /2,98

En aquesta imatge es pot observar clarament el recorregut dels forjats que conformen l'estructura de l'edifici, els quals es troben a menys temperatura que la resta del parament, tal i com hem pogut observar en el termograma anterior. Amb el gràfic de la línia 1 es volen analitzar aquests canvis de temperatura que pateix la façana.

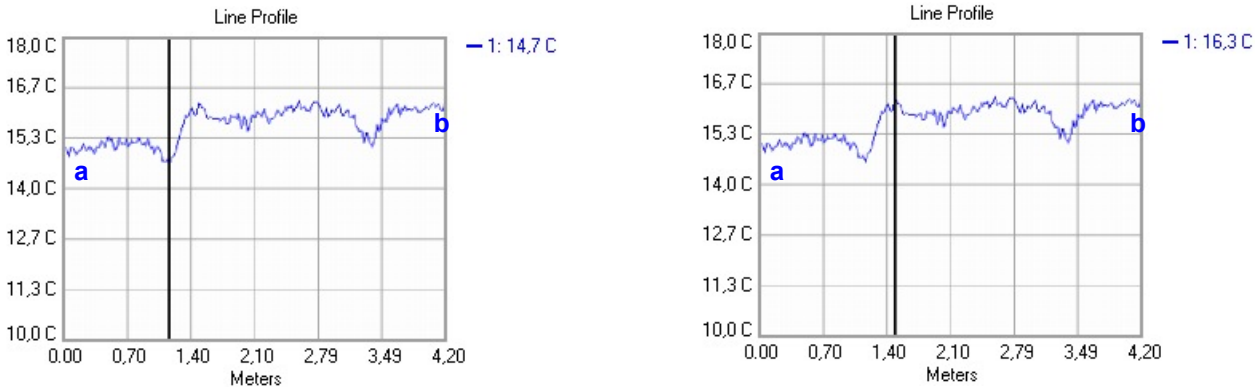


Figura 1.92: Gràfic comportament tèrmic línia 1 on es pot visualitzar la temperatura en diferents punts d'un mateix element constructiu (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

També es pot detectar que la xemeneia de xapa es troba a temperatura més baixa, i genera una ombra al parament vertical, que comporta que aquesta zona ombrejada es trobi a menys temperatura (àrea 3). En referència al parament vertical, aquest es troba a temperatura de 16,3 °C, per on es produeixen pèrdues energètiques per absència d'aïllament tèrmic. Si comparem els termogrames de la façana Sud, amb els termogrames de la façana Nord, podem concloure que en el moment de la presa del termograma s'estaven produint més pèrdues energètiques per la façana Nord.

En l'àrea 2, existeix una zona amb una temperatura més elevada de 17,3 °C, que destaca sobre la temperatura mitja de la paret. Si ens fixem atentament en la imatge, aquesta zona amb més temperatura es troba sota el forjat, i si ens fixem en el forjat inferior, també existeix aquesta àrea amb més temperatura. Es dedueix que es tracta d'un pont tèrmic en la trobada del parament amb el forjat. En cas de que les aules tinguessin cel ras, podríem deduir que es tracta d'un tipus d'instal·lació que discorre per sota del forjat, i que estaria facilitant la pèrdua d'energia, però en aquest cas l'escola no disposa de cel ras a les aules, i per aquest motiu ens centrem en pensar que es tracta d'un pont tèrmic en la trobada del forjat amb el mur de tancament, i que també hem pogut observar en altres termogrames.

A continuació, s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels):

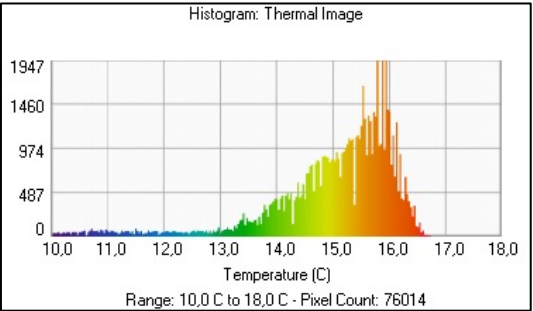
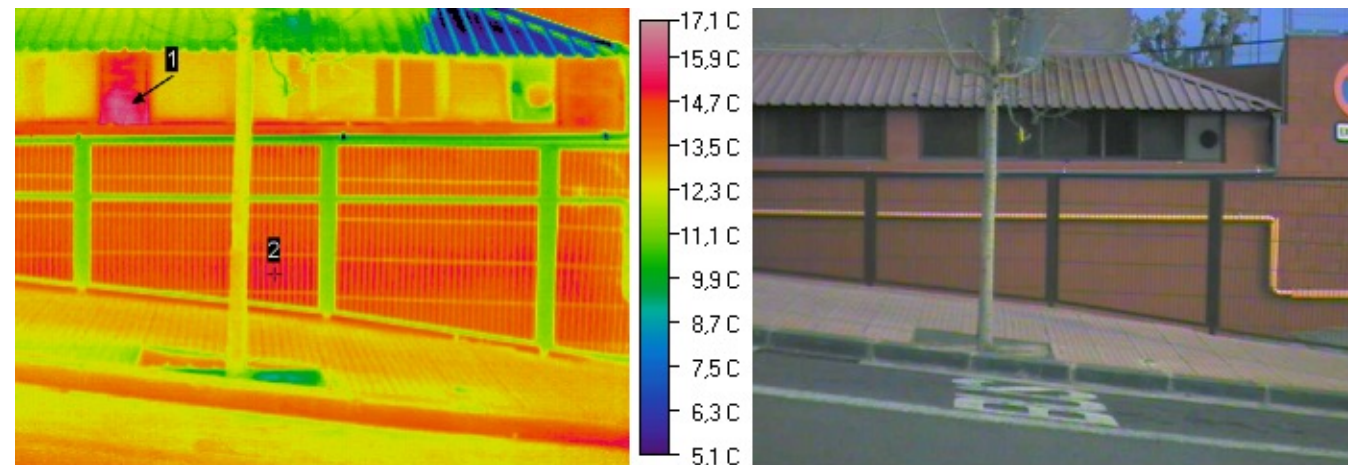
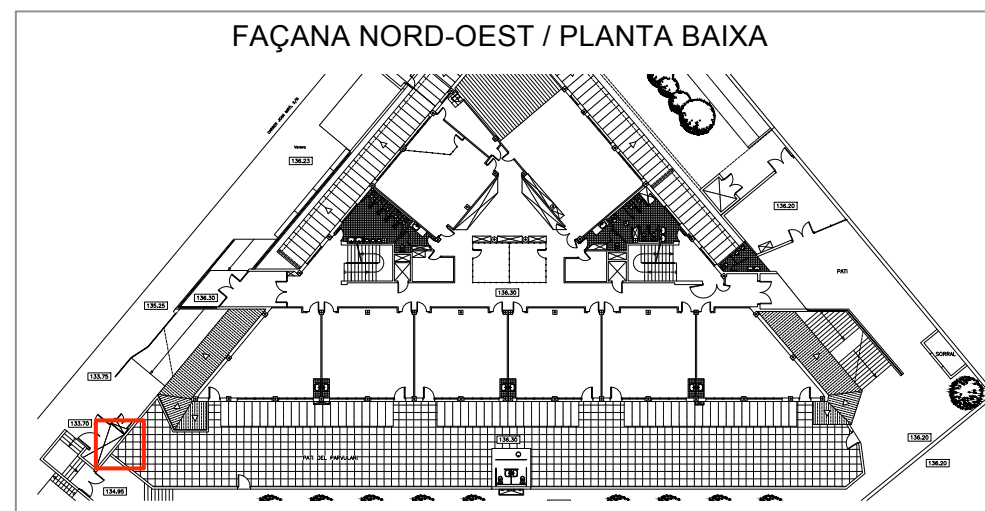


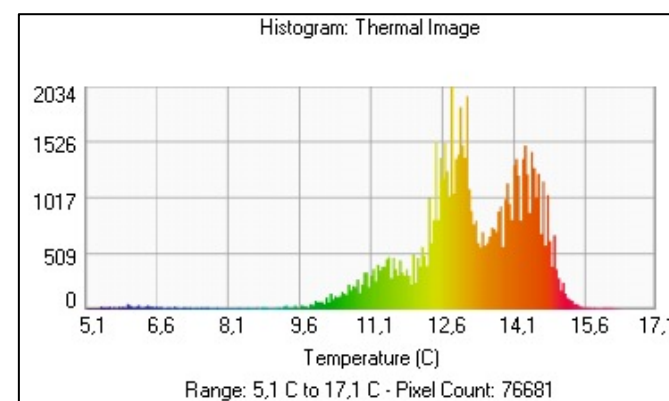
Figura 1.93: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 17:

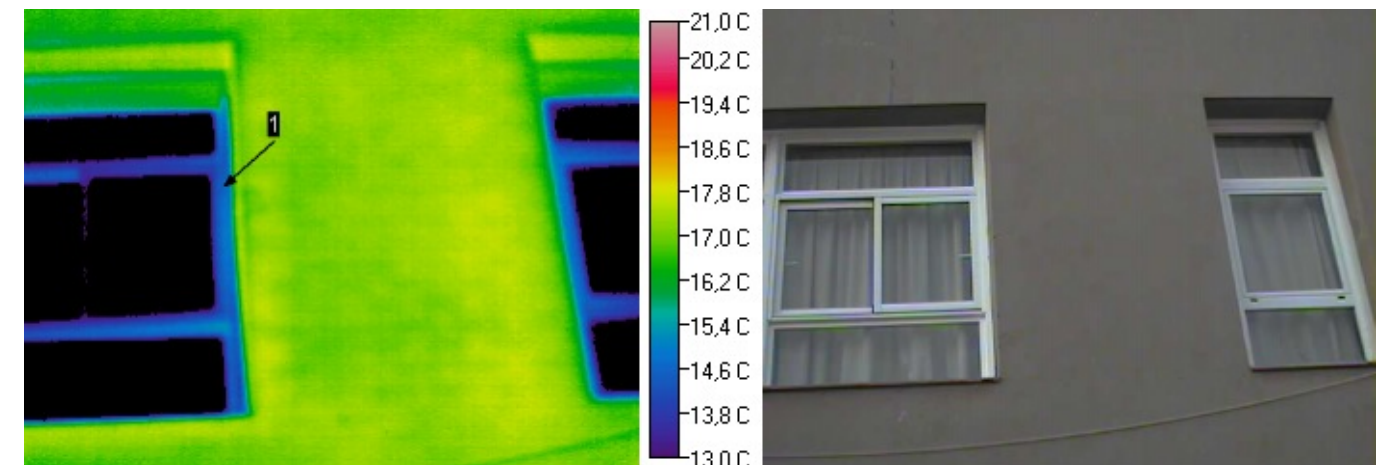
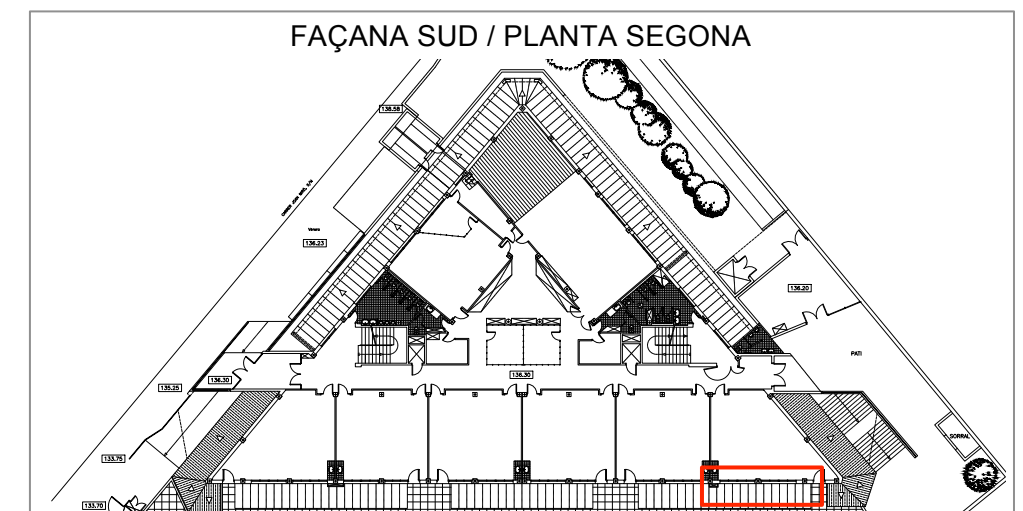
- Ubicació:



La imatge termogràfica exposada, fa referència a la zona de maquinària de l'escola. Si observem la part inferior es troba a temperatura elevada, degut a l'acumulació calor que desprèn la maquinaria i que es dissipa cap a l'exterior a través del mur de façana, el qual no està aïllat. La zona amb més temperatura (color vermell inferior), fa referència a la ubicació exacta de les màquines. La fletxa 1, la ens indica la màxima temperatura del termograma, i fa referència a una finestra oberta per on està sortint l'energia interior de la sala de màquines. Si ens fixem en la coberta, es tracta de xapa col·laborant, la qual té una temperatura inferior.

**TERMOGRAMA 18:**

- Ubicació:



Aquest termograma vol mostrar una part de la façana sud, on es pot observar que la temperatura del parament és estable, els vidres són dobles i els perfils metàl·lics que conformen la fusteria tenen trencament de pont tèrmic, i per tant no es produeixen pèrdues energètiques. Si el sistema de calefacció interior estigués encès, el parament de façana estaria a més temperatura, però tal i com hem pogut observar en imatges anteriors, les pèrdues no es produeixen per les obertures de façana.

1.4.5 PROPOSTES D'ACTUACIÓ:

Un cop analitzat termogràficament l'edifici escolar Isabel de Villena és necessari dedicar un apartat a treballar les possibles mesures d'actuació, que es podrien duu a terme per millorar l'eficiència energètica de l'edifici.

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, el comportament correcte dels usuaris en temes d'eficiència energètica és essencial. Per aquest motiu la primera línia d'actuació està enfocada a conscienciar a l'usuari en referència a l'encesa i apagat de llums, així com en l'obertura o el tancament de les finestres en relació a la temperatura interior de l'edifici, i en l'ús correcte dels elements de protecció solar.

La segona proposta d'actuació es centra en treballar en els diferents elements de protecció solar que trobem en l'edifici. Totes les finestres de l'edifici manquen de persianes, exceptuant les finestres de la planta baixa de la façana Sud les quals tenen persianes i tendals de protecció solar, les finestres de planta baixa de la façana Est, les quals tenen persianes enrotllables, i les finestres centrals de la última planta de la façana Nord-Oest, on també trobem persianes enrotllables. La resta de les finestres es protegeixen amb cortines de tela o estors. Es proposa la col·locació de tendals o lamel·les de protecció solar en totes les finestres de la façana Sud, per protegir dels raigs Solars a l'Estiu, i contribuir als guanys a l'Hivern, així com en la col·locació de persianes en totes les finestres de l'edifici.

La tercera proposta d'actuació fa referència a la substitució de part de la fusteria exterior de l'edifici. Tal i com hem pogut comprovar amb els termogrames anteriors, es produeixen pèrdues energètiques en algunes finestres de l'immoble, ja que la fusteria no té trencament de pont tèrmic, i segons la memòria constructiva els vidres són senzills de 5 mm de gruix. Les grans dimensions d'aquestes finestres, i la seva transmitància tèrmica, contribueixen a que gran part de l'energia es perdi per aquests elements de façana. Per solucionar aquest problema, es proposa substituir la fusteria actual, per fusteria metàl·lica amb trencament de pont tèrmic i vidre amb doble càmera (6/6/4), tal i com podem trobar en algunes finestres de l'edifici.

La quarta proposta d'actuació es centra en treballar amb la pell de l'edifici. En l'anàlisi termogràfic realitzat, hem pogut comprovar que per la façana es produeixen grans pèrdues d'energia. Amb les dades de temperatura obtingues amb el present estudi termogràfic, i amb el recolzament dels càlculs

realitzats pels companys que han fet l'avaluació energètica de l'edifici, podem comprovar que el tancament existent no compleix les exigències de transmitància tèrmica. Es proposa realitzar un trasdosat autoportant per l'interior de l'edifici compost d'una capa d'aïllament i una capa de guix. Sabem que aquesta solució comporta una reducció de l'espai interior, per tant en cas de no permetre's aquesta alternativa es proposa el sistema d'aïllament de la façana en el qual s'omple la cambra d'aire, que és una possibilitat quan no es pot perdre espai interior.

També es proposa realitzar un manteniment correctiu i preventiu constantment, per garantir el confort de l'usuari, així com comprometre's en col·laborar amb el medi ambient, reduint les emissions de Co₂, i els elevats costos de les energies.

1.4.6 CONCLUSIONS:

L'edifici objecte d'estudi va ser construït abans del 1979, per aquest motiu no és insòlit que presenti problemes tèrmics en la seva envolupant, ja que en l'any de la seva construcció no existia una normativa que regulés aquest aspecte.

Aquests problemes de temperatura provoquen desconfort als ocupants, degut a la dificultat d'escalfament de l'edifici a l'Hivern, i el sobreescalfament a l'Estiu. Les presents complicacions en l'assoliment de l'equilibri tèrmic desenvolupen zones amb humitats per condensació en els punts més freds de l'edifici, així com pèrdues energètiques degut a la manca d'aïllament en tot el parament i les deficientes fusteries de les finestres. En les propostes anteriors, hem donat importància en la col·locació de proteccions solars les quals contribueixen en un percentatge alt en l'eficiència energètica de l'edifici. També cal mencionar les incorrectes solucions constructives dels brancals, ampits i dintells, per on s'originen dissipacions energètiques i contribueixen a augmentar la demanda energètica.

En aquest apartat també es vol aclarir, que hem pogut extreure molta informació de temperatures dels termogrames, ja que el dia de l'anàlisi termogràfic de l'edifici era un dia del mes d'Abril, el qual la temperatura exterior era molt baixa, i l'Escola va posar en funcionament els sistemes de calefacció.

Per finalitzar, es vol informar que en aquesta avaluació energètica, l'ús de la termografia ha demostrat ser imprescindible, no només per aportar dades reals, a partir de les quals podem realitzar càlculs energètics que són necessaris en un informe i extreure conclusions, sinó, per ajudar a comprendre de forma visual, els problemes energètics que presenta l'edifici als seus usuaris.

(Inspecció i informe termogràfic de façanes segons les directrius de la Norma Europea EN 13187:1999)

1.5 ANÀLISI TERMOGRÀFIC INSTITUT NARCÍS MONTURIOL

En aquest anàlisi termogràfic, es pretén avaluar l'estat actual del tancament de façana de l'escola IES Narcís Monturiol, fent recerca de possibles punts crítics que contribueixin a la presència d'humitat o a la pèrdua d'energia, d'aquest edifici construït fa 46 anys, però que s'ha reformat fa 8 anys.

1.5.1 INTRODUCCIÓ

L'edifici objecte d'estudi, fa referència a un edifici escolar construït l'any 1966, que es troba ubicat a Barcelona, en la confluència entre el carrer Harmonia s/n i el carrer de la Poesia N° 2. A l'any 2004 es va realitzar una ampliació de l'edifici en la qual es va construir el nou gimnàs, i es va reformar totalment la resta de l'edifici.



Figura 1.94: Plànol de situació de l'edifici Doctor Ferran i Clúa (Font: Sede Catastro)

1.5.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DE L'EDIFICI

L'edifici es compon de planta semisoterrani, planta baixa, i planta primera. A la planta baixa i a la planta primera es troben ubicades les aules i els despatxos, mentre que a la planta semisoterrani es troba ubicat el gimnàs, els vestuaris i la cuina-menjador.

L'estructura de l'edifici està realitzada amb formigó armat, i en referència a la coberta es tracta d'una coberta plana no transitable, amb una capa exterior de graveta.

La façana té un gruix de 30 cm i està formada per maó gero, un cambra d'aire i un envà interior. El revestiment exterior és de monocapa i l'interior és de guix.

La fusteria exterior es tracta de finestres corredisses d'alumini, i totes disposen de lamel·les metàl·liques per protegir de l'entrada de raigs solars. Els vidres són dobles de 5+5, càmera de 12 i 4+4.

1.5.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI

1.5.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI:



Figura 1.95: Imatges de les diferents façanes de l'edifici (Font: Elaboració pròpia)

1.5.3.2 PLÀNOLS DE L'EDIFICI:

Planta Semi-soterrani:

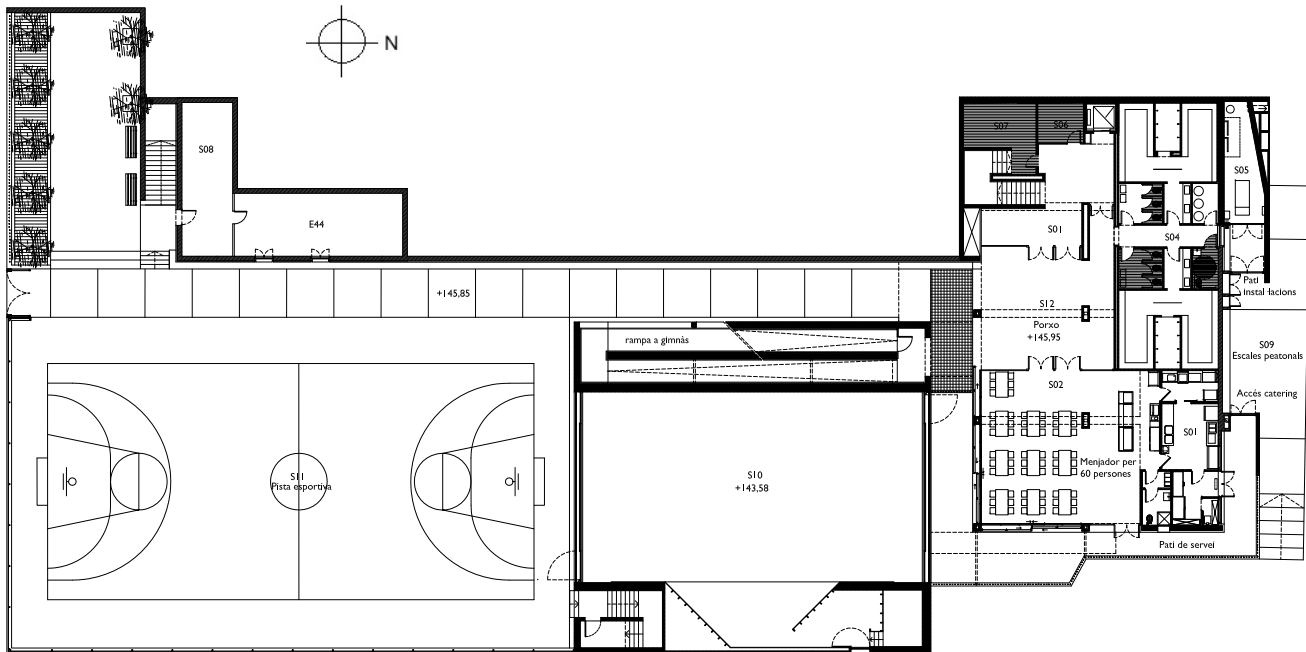


Figura 1.96: Planta semi-soterrani

Planta Baixa:

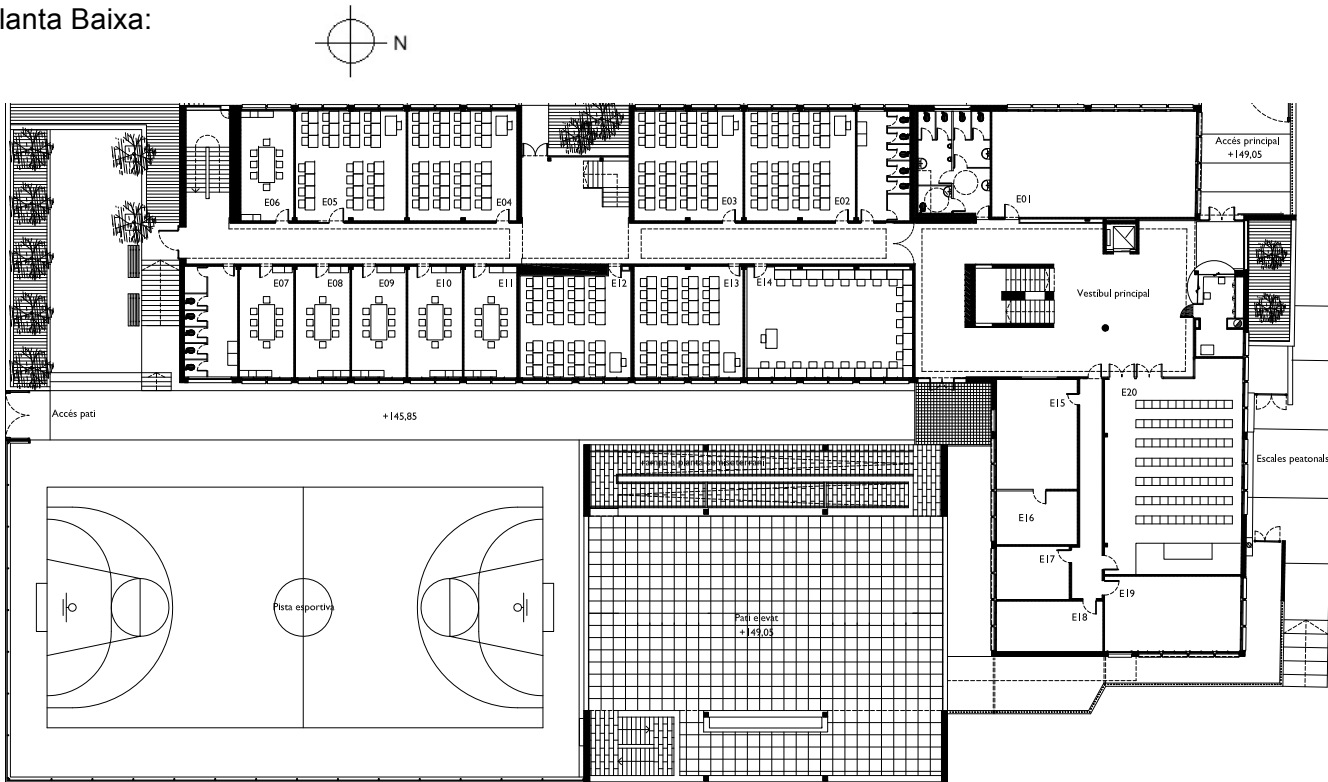


Figura 1.97: Planta Baixa

Planta Primera:

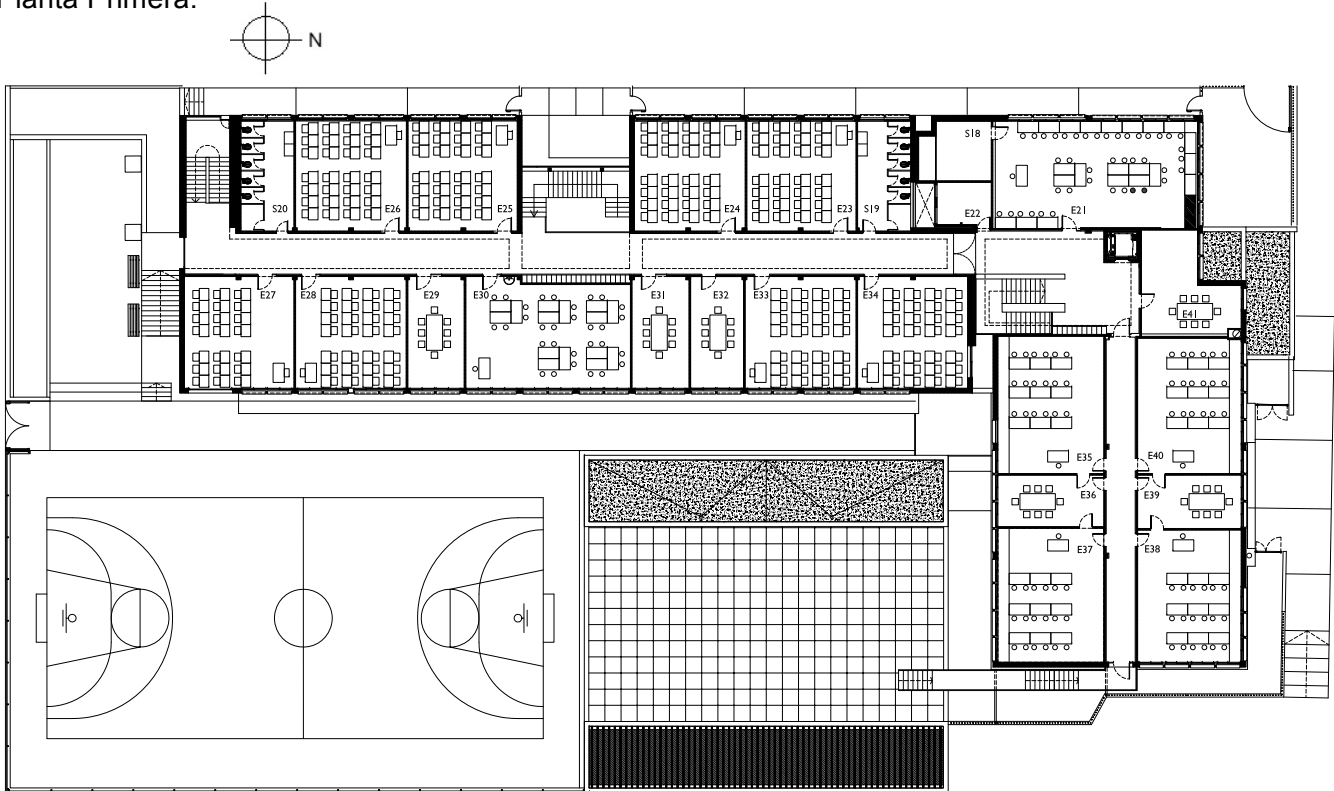


Figura 1.98: Planta primera

1.5.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS

L'avaluació energètica que s'ha realitzat en aquesta Escola, ha servit per determinar la necessitat d'implementar diverses actuacions en l'edifici, amb la finalitat de reduir les elevades pèrdues energètiques que pateixen les aules de l'escola. La majoria d'aquestes pèrdues energètiques són fruit de l'antiguitat de l'edifici, i per tant del desconeixement en aquell moment dels avanços que s'han anat produint en el camp de l'estalvi energètic.

En aquesta edifici ha estat necessari realitzar dos anàlisis termogràfics. Un primer anàlisi corresponent amb l'època de la primavera (mes de Maig) on la temperatura interior i exterior estava molt equilibrada, i un segon anàlisi termogràfic corresponent al mes de Desembre on la temperatura interior es trobava més elevada per la presència de calefacció i la temperatura exterior era molt baixa. S'han volgut realitzar aquestes dues inspeccions per comprovar com afecta l'època de l'any en la presa d'un correcte termograma, i poder detectar punts crítics que no s'havien visualitzat en el primer anàlisi.

Les dades de la inspecció termogràfica realitzada al mes de Maig, s'han recollit amb una fitxa de recollida de dades, que s'exposa a continuació:

MAIG (08 / 05 / 2012)

Localitat	Adreça	Nº	Vent: Direcció i velocitat	Orientació	Dia/mes/any	Hora Inici anàlisi	Estat del cel	Temp. Exterior	H % Exterior	Hora fi anàlisi
Barcelona	C/ de l'Harmonia	s/n	12 km/h SO	Altitud 200m	08 / 05 / 2012	08,15 h	No ennuvolat, assolellat	19 °C	57 %	09,25 h

Nº Presa	Ubicació	Distància presa del termograma	Tº Exterior	Tº exterior 24 hores abans	Tº Interior	Tº Superficial	H % Exterior	H% interior	Observacions
TH910001 TH910003 TH910004 TH910011	Façana Est	6 m	18,5 °C	18 °C	19,8 °C	17,3°C (paret exterior)	56,6 %	-	Absència de vegetació que provoqui ombra a la façana Est. Existència de proteccions solars (lamel·les) orientables manualment, i de proteccions horitzontals (voladius) en la zona superior de les finestres.
-	Façana Nord	4 m	18,1 °C	18 °C	19,8 °C	17,7 °C	60 %	-	Anàlisi de la façana Nord, per la zona d'entrada principal de l'escola.
TH910006 TH910007 TH910008 TH910009	Façana Oest	10 m	19 °C	18 °C	20,4 °C	15 °C	48,8 %	56,1 %	Existència d'un parc limitant amb façana Oest, amb arbres i vegetació abundant, que provoquen ombra a l'edifici.
TH910005 TH910010	Façana Sud	15 m	19,4 °C	18 °C	20,2 °C	15 °C	58,1 %	56,1 %	Existència d'arbres que provoquen ombra a la façana Sud. Reixes de ventilació superiors i inferiors en façana.
TH910012 TH910013 TH910014	Façana Est (exterior poliespor tiu)	10 m	18,9 °C	18 °C	19 °C	19,1 °C	55,9 %	-	Analitzem les diferències de temperatura de la façana Est corresponent al poliesportiu de l'Escola. Poliesportiu, interior el qual, no es troba condicionat tèrmicament.

Taula 1.99: Fitxa de recollida de dades al mes de Maig (Font: Elaboració pròpia, i Meteoclimatic.)

Les dades de la inspecció termogràfica realitzada al mes de Desembre s'han recollit amb una fitxa de recollida de dades, que s'exposa a continuació:

DESEMBRE (04 / 12 / 2012)

Localitat	Adreça	Nº	Vent: Direcció i velocitat	Orientació	Dia/mes/any	Hora Inici anàlisi	Estat del cel	Temp. Exterior	H % Exterior	Hora fi anàlisi
Barcelona	C/ de l'Harmonia	s/n	47 km/h	Altitud 200 m	04 / 12 / 2012	08,15 h	No ennuvolat- Assolellat	9 °C	67 %	09,35 h

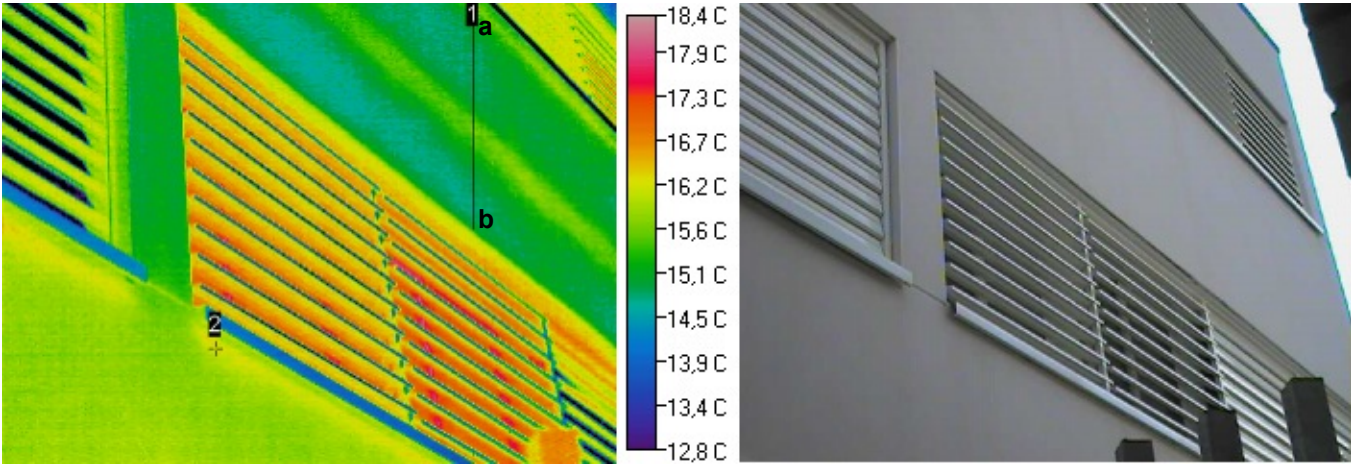
Nº Presa	Ubicació	Distància presa del termograma	Tº Exterior	Tº exterior 24 hores abans	Tº Interior	Tº Superficial	H % Exterior	H% interior	Observacions
TH910002 TH910003	Façana Sud (zona despatxos)	7 m	9 °C	11 °C	19 °C	1,5 °C	61,5 %	-	Comença a reflectir-se el Sol, el qual encara no provoca sobreescalfament al parament ja que és molt d'hora.
TH910004 TH910005 TH910007 TH910008	Façana Est	15 m	5,5 °C	9,3 °C	19,2°C	3,5 °C	65 %	-	Existència de lamel·les obertes i tancades que ens donen diferents resultats en el termograma.
TH910006	Façana Sud (façana gimnàs)	7 m	5,5 °C	9,3 °C	17,9 °C	3,5 °C	61 %	-	Presència de dos tipus d'acabat de façana que cal tenir present en l'anàlisi de les imatges.
TH910009 TH910010 TH910011	Façana Sud (façana limitant amb caixa d'escala)	8 m	9 °C	11 °C	18,8 °C	1-3 °C	58,1 %	-	Reixa de ventilació de grans dimensions en la façana. A la part interior es troba la caixa d'escala principal de l'edifici.
TH910012 TH910013 TH910014 TH910015 TH910016	Façana Oest	10 m	9 °C	11 °C	19 °C	1 °C	51,9 %	-	Aquesta façana limita amb un parc, on existeix arbres i vegetació que provoquen ombra al parament.
TH910018	Façana Est (limitant amb carrer)	8 m	9 °C	11 °C	19 °C	2,5 °C	58 %	-	Observem que la planta inferior té un acabat diferent a les plantes superiors,

Taula 2: Fitxa de recollida de dades al mes de Desembre (Font: Elaboració pròpia, i Meteoclimatic.)

ANÀLISI TERMGRÀFIC REALITZAT AL MES DE MAIG (08 / 05 / 2012):

TERMOGRAMA 1:

- Ubicació:



Línia/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	14,4 °C	15,6 °C	14,8 °C	0,93	18,5 °C	6 m	0,76 m
2	-	16,1 °C	-	0,93	18,5 °C	6 m	-

En el termograma exposat, podem observar una irregularitat en la distribució tèrmica en la superfície de la façana. Es detecta el pas del forjat, el qual es troba a més temperatura, mentre que la zona inferior del forjat es troba a temperatura baixa degut a un excés d'humitat. El front del forjat és una via de sortida de l'energia interior degut a la composició de la façana, el que facilita que es produeixi un pont tèrmic en aquest punt de l'immoble (veure figura 2.1). Aquestes irregularitats de temperatura, són degudes a la manca d'aïllament en el parament de façana. El recorregut de la línia 1 vol demostrar les diferents temperatures que existeixen en aquest mateix element constructiu, verificant l'augment de temperatura coincidint amb el pas del forjat:

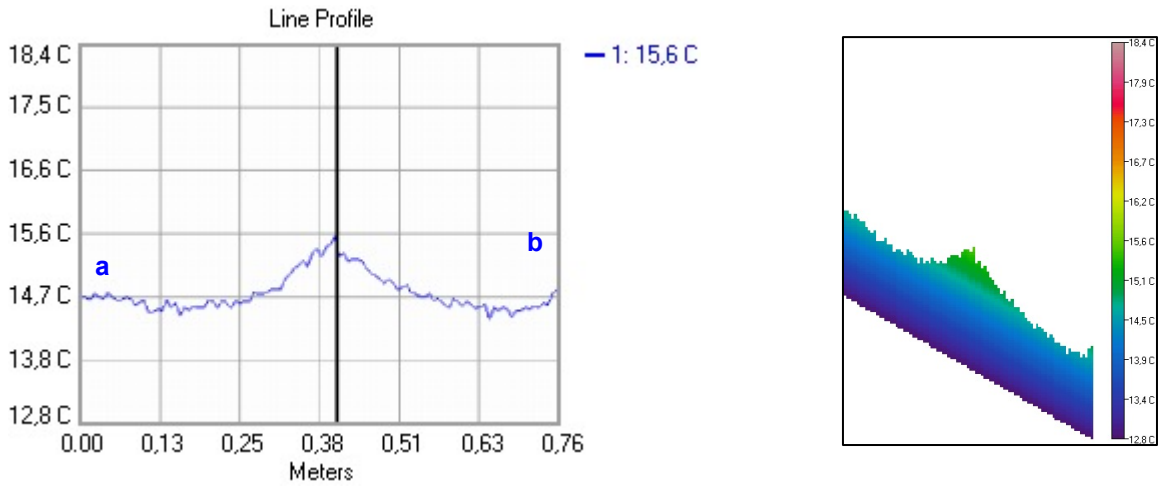


Figura 2.1: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

En la imatge infraroja, podem comprovar que les finestres estan obertes i per on s'estan produint lleugerament dissipacions de calor interior. A continuació, s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels):

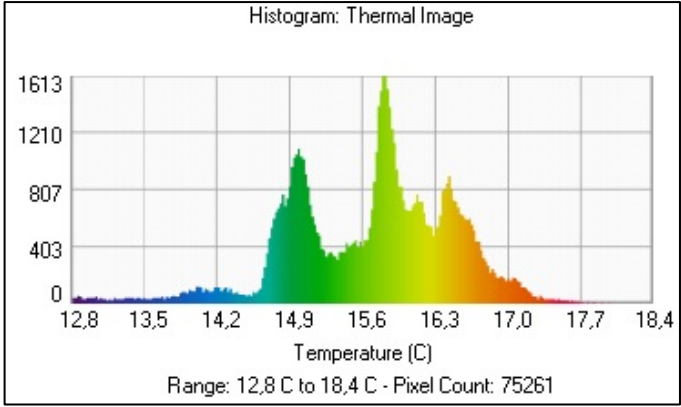
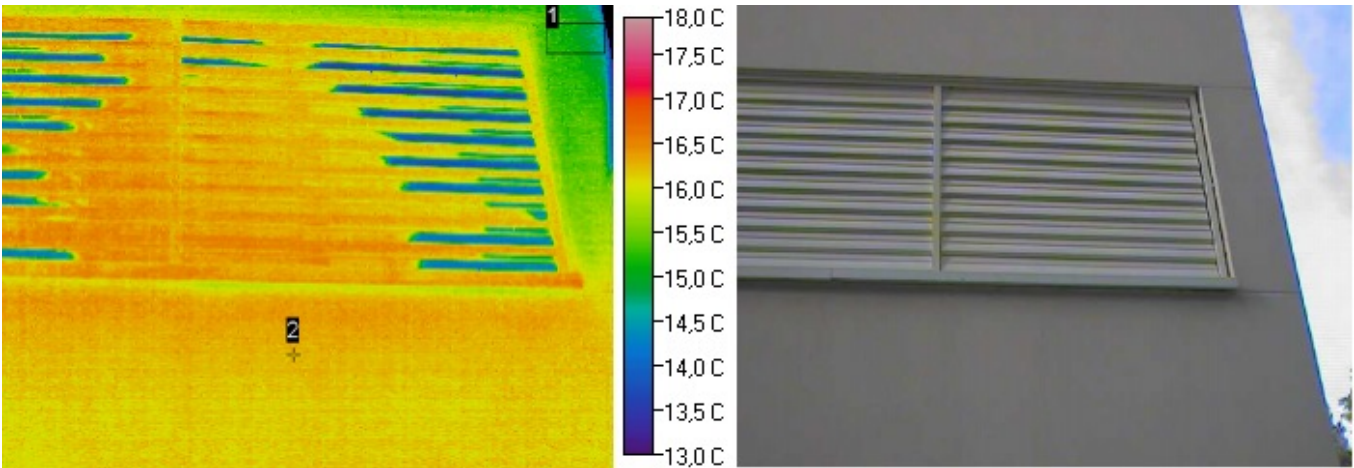
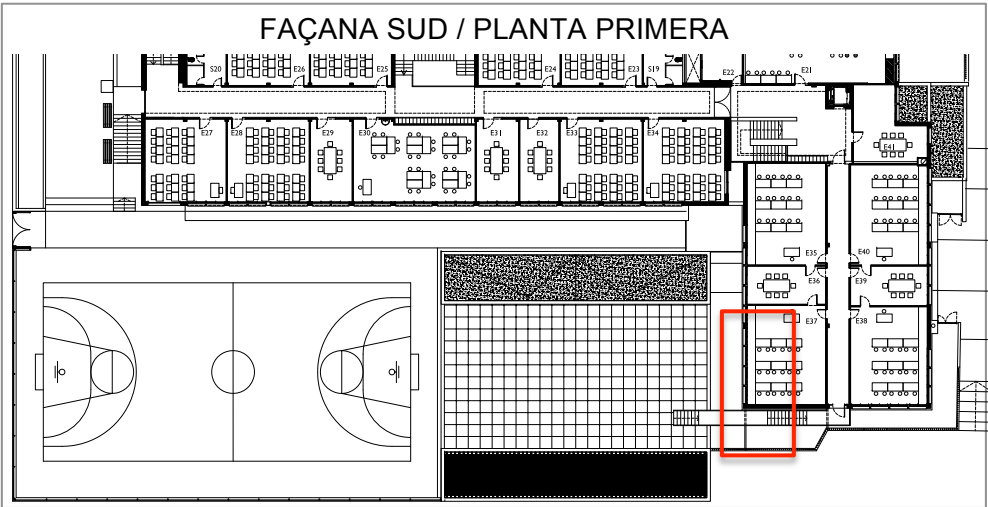


Figura 2.2: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

Cal destacar que l'anàlisi termogràfic d'aquest edifici, es va realitzar al mes de Maig, on els sistemes de calefacció no estan en funcionament, i per tant la temperatura interior i exterior està més equilibrada. Tot i això, com la presa de les imatges es va realitzar a primera hora del matí, la temperatura interior és lleugerament més elevada que la temperatura exterior, ja que l'edifici ha estat tancat tota la nit. Això ens ha deixat verificar punts crítics en l'envolupant de l'edifici.

TERMOGRAMA 2:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	13,5 °C	15,3 °C	14,8 °C	0,93	18,5 °C	10 m	0,07 m ² /2,26
2	-	16,2 °C	-	0,93	18,5 °C	10 m	-

Aquesta imatge ens dona informació de les diferents temperatures que existeixen en aquesta part de la façana. L'àrea 1 assenyalava la cantonada de l'edifici de la façana Sud amb la façana Est, la qual es troba a menys temperatura que el punt 2. Aquesta disminució de temperatura es deu a un excés d'humitat retinguda en el parament, ja que es tracta d'un punt fred de l'edifici. Aquesta paret al no estar aïllada tèrmicament, permet que la humitat ambient de l'interior de l'edifici passi a estat líquid formant aigua. A més l'aire calent admet més humitat en forma de vapor que l'aire fred, per tant una incorrecta regulació de la calefacció amb variacions brusques de temperatura implica problemes de condensació en parets i finestres, com podem observar en aquest cas.

En referència a la finestra, no podem extreure conclusions fiables, ja que com podem observar existeixen reflexes exteriors que alteren el resultat final.

A continuació, s'exposa un histograma del rectangle 1 i un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D del termograma:

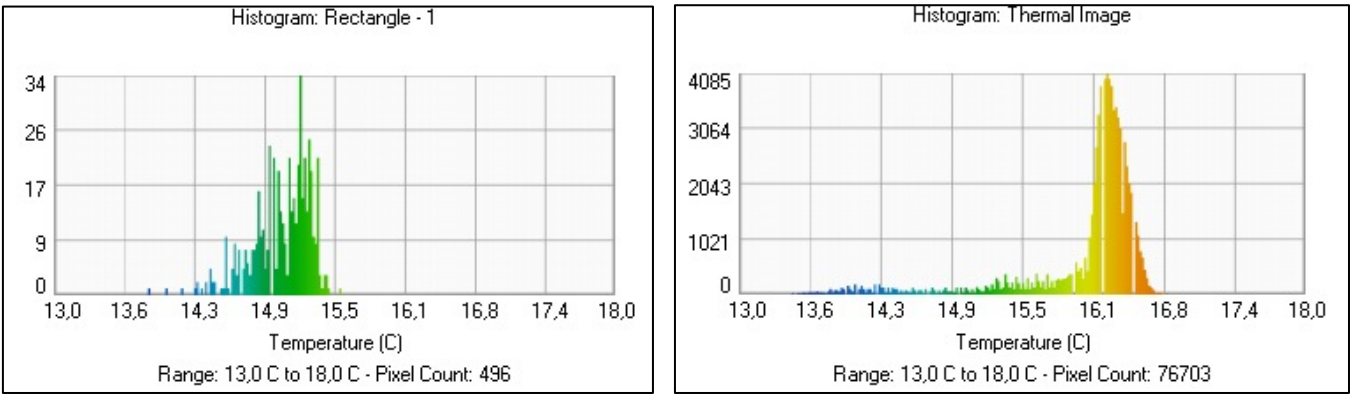


Figura 2.3: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

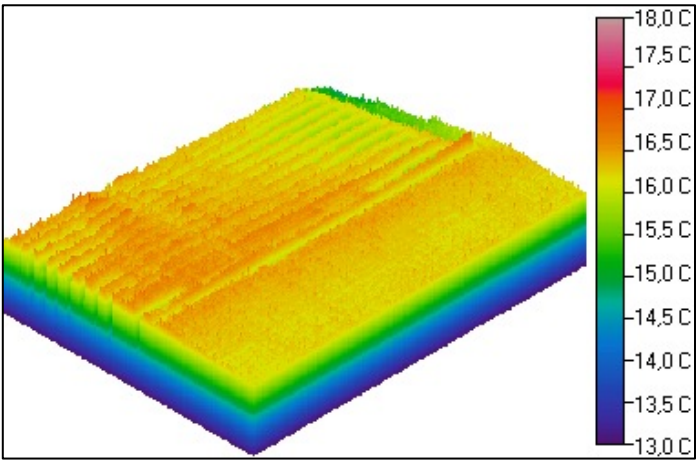
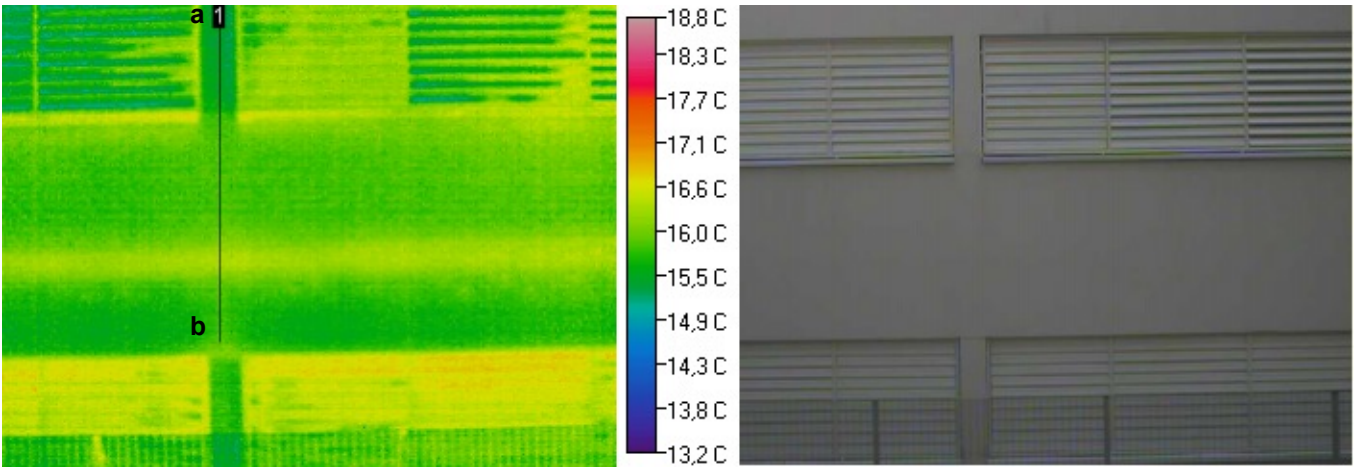


Figura 2.4: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

Cal emfatitzar, que la presa dels termogrames d'aquest edifici, s'han pres a primera hora del matí. Per aquest motiu, les temperatures dels tancaments no es deuen a les radiacions solars absorbides durant el dia, com pot ocórrer en anàlisis termogràfics realitzats a última hora del dia on podem trobar façanes que poden estar radiant l'energia absorbida durant el dia.

TERMOGRAMA 3:

- Ubicació:



Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	15 °C	16,3 °C	15,6 °C	0,93	18,5 °C	10 m	1,96 m

Aquest termograma correspon a la planta baixa i a la planta primera de la façana Oest. Mentre que a la imatge digital no es pot detectar la situació del forjat, en la imatge infraroja podem identificar el recorregut del mateix, ja que es troba a més temperatura que la resta de la façana. No s'observa una gran diferència de temperatura entre forjat i parament, ja que la temperatura interior de l'edifici i l'exterior estan molt equilibrades. Això és degut, a que la presa del termograma es va realitzar al mes de Maig, i no estaven en funcionament els sistemes de calefacció o aire condicionat, que ens puguin ajudar a detectar pèrdues energètiques per la diferència de temperatura entre interior i exterior. Tot i això, la temperatura interior és lleugerament superior que l'exterior i ens deixa entreveure aquest pont tèrmic en la façana, que es produeix degut a la deficient solució constructiva de la façana (veure figura 2.5).

La línia 1 que podem veure en la imatge termogràfica, ens serveix per poder visualitzar més fàcilment aquest salt tèrmic en la zona del forjat.

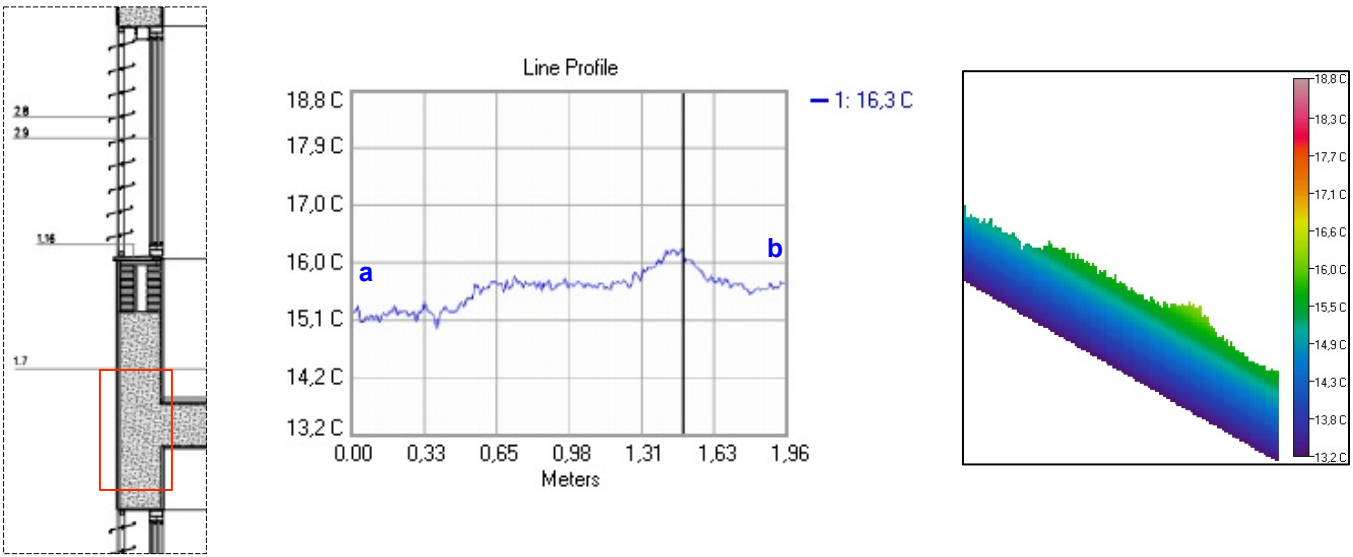


Figura 2.5: Detall secció façana Oest, gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Projecte executiu d'adequació de l'IES Narcís Monturiol i Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

A continuació s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D del termograma:

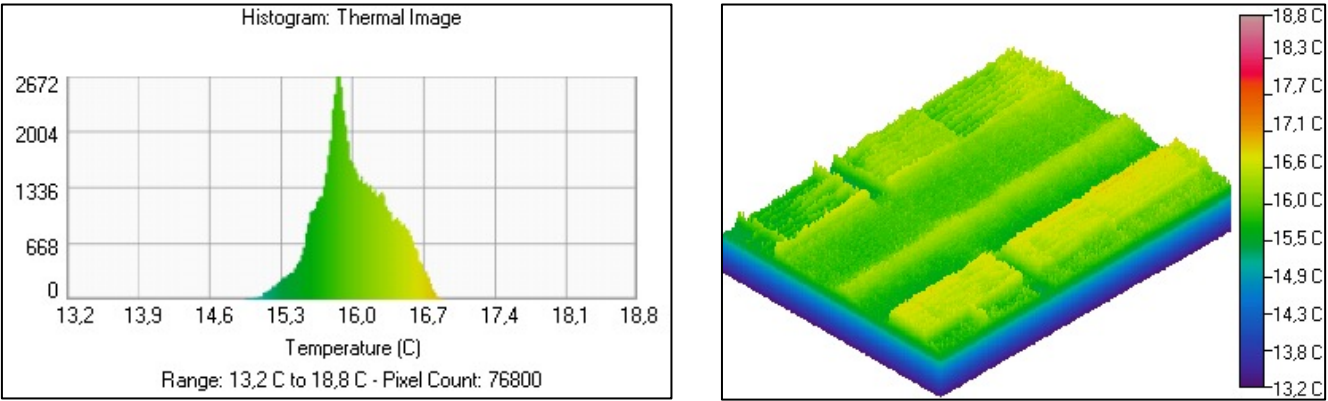
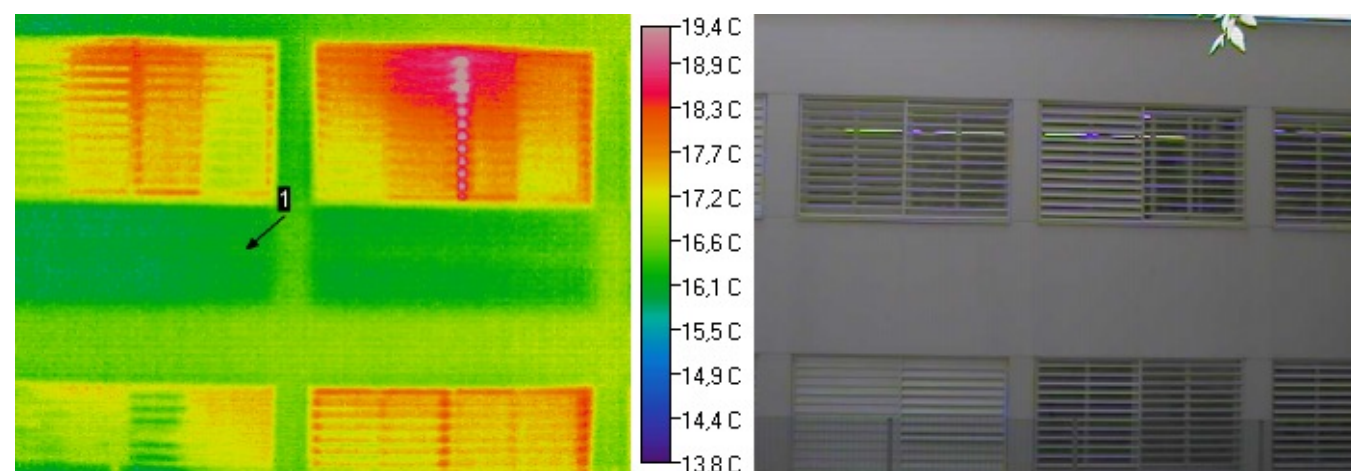


Figura 2.6: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 4:

- Ubicació:

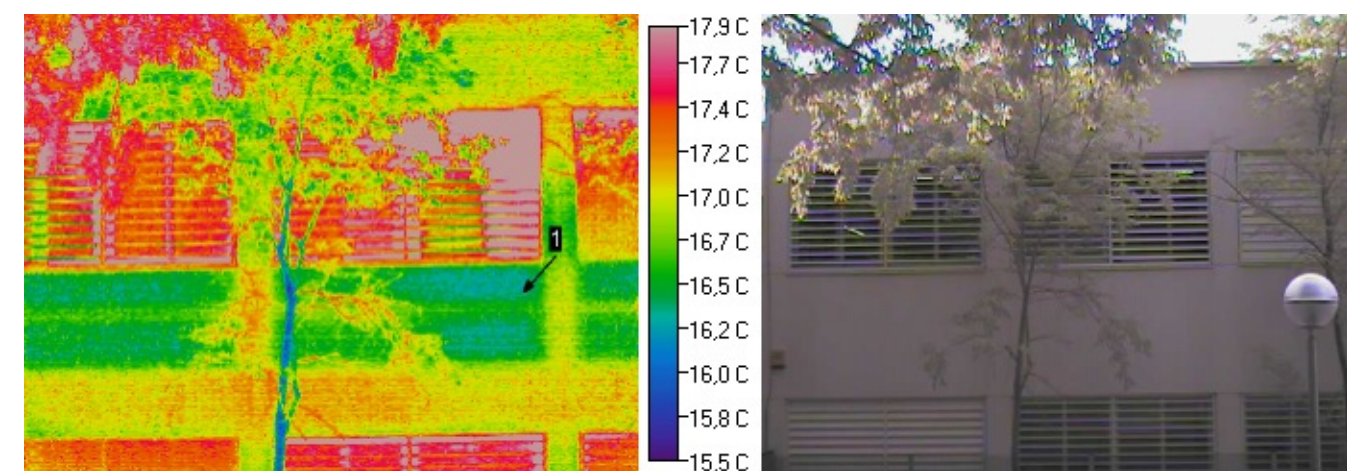


Aquests termogrames pertanyen a la façana Oest de l'edifici. La fletxa 1, ens indica una zona a baixa temperatura que es troba en la part inferior de les finestres. Suposem que antigament les finestres tenien dimensions més grans, i amb la reforma realitzada l'any 2004, es va disminuir la grandària de les mateixes, deixant entreveure a partir dels raigs infrarojos, que es tracta d'una part que trenca la continuïtat de la façana, ja que s'ha afegit material per tancar part del buit, i es genera un punt fred en la façana Oest.

En referència a les finestres, no podem extreure conclusions fiables, ja que es reflecteix tant l'ambient interior com l'exterior. Tot i això, podem constatar que la finestra superior esquerra, està lleugerament oberta i deixa escapar aire interior.

TERMOGRAMA 5:

- Ubicació:

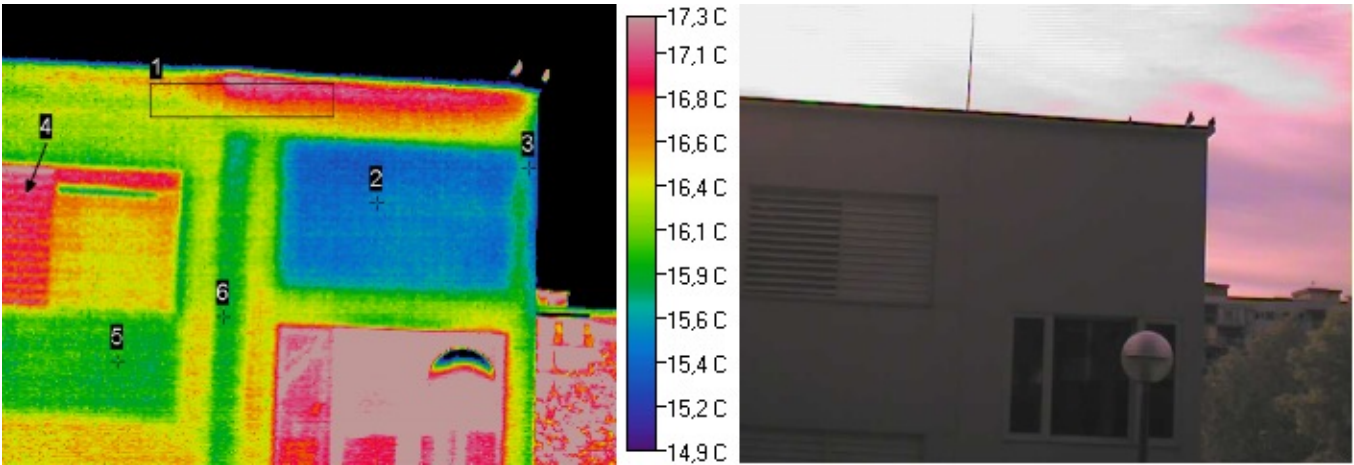


En aquest termograma es pot observar, que la reducció dels buits de les finestres es va realitzar en totes les finestres de la planta primera de la façana Oest, i que conseqüentment, aquestes parts afegides de canvi de material, són un punt humit i es troben a menys temperatura que la resta de la façana. L'aire calent admet més humitat en forma de vapor que l'aire fred, per tant una incorrecta regulació de la calefacció amb variacions brusques de temperatura implica problemes de condensació en punts dèbils, com en aquest cas la zona inferior de les finestres.

En el termograma següent ens trobem en la mateixa situació, i per facilitar la comprensió d'aquest s'ha exposat el detall constructiu de la secció de la façana, per veure aquest canvi de material.

TERMOGRAMA 6:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	15,8 °C	17,2 °C	16,5 °C	0,93	19 °C	10 m	0,25 m ² /5,05
2	-	15,2 °C	-	0,93	19 °C	10 m	-
3	-	15,3 °C	-	0,93	19 °C	10 m	-
5	-	15,6 °C	-	0,93	19 °C	10 m	-
6	-	15,7 °C	-	0,93	19 °C	10 m	-

L'anàlisi termogràfic d'aquesta part de l'edifici, ens dona molta informació que a simple vista i/o en la imatge digital no podem detectar, i que afecten energèticament a l'edifici. L'àrea 1 ens mostra la part

superior de la façana, la qual es troba a temperatura elevada, comparat amb la resta de la façana, i per on hi ha un desequilibri tèrmic important. Deduïm que es tracta d'una zona de pas d'instal·lacions, ja que la part interior és la caixa d'escala de l'edifici, la qual no es troba ocupada ni calefactada ja que no estan encesos sistemes de calefacció en l'edifici.

El punt 2 es troba a una temperatura inferior que la resta de la façana, i si ens fixem detingudament en la imatge infraroja, podem comprovar que hi ha un excés d'humitat en el parament, que en la imatge digital no es detecta. Aquest fet és degut a que es tracta d'una part de façana afegida en la reforma realitzada al 2004, i per on s'acumula humitat, i es tracta d'una solució constructiva composta per una paret de doble fulla amb càmera d'aire. En relació amb aquesta baixada de temperatura, també tenim el punt 3, el qual fa referència a la cantonada de l'edifici, per on també existeix humitat acumulada, ja que es tracta d'un punt fred de l'edifici.

La fletxa 4, ens indica una finestra oberta, per on s'escapa aire calent de l'interior de l'edifici, ja que tot i que no existeix una gran diferència de temperatura entre interior i exterior, es va comprovar en el moment de la presa del termograma, que la temperatura interior de l'edifici era lleugerament més elevada que la temperatura exterior (veure taula 1.99).

El punt 5, ens mostra la mateixa situació dels termogrames anteriors 4 i 5, un excés d'humitat retinguda en la part inferior de les finestres de la cara Oest de l'edifici. Aquest fenomen existeix, ja que es tracten de finestres les quals s'han reduït les seves dimensions en la reforma del 2004, i a la part afegida es produeix humitat per condensació (veure figura 2.7).

En referència al punt 6, podem comprovar que ens indica una secció vertical de la façana, que es troba a temperatura baixa, aproximadament a la mateixa temperatura que el punt 5. Si observem la imatge digital aquesta zona més humida no es detecta. Segons la imatge infraroja, deduïm que es tracta d'un element constructiu, com pot ser un pilar que conforma l'estructura de l'edifici.

Fent esment de la finestra inferior, la qual es troba a temperatura molt elevada, cal destacar que no es pot extreure una conclusió fiable, ja que durant la presa del termograma, s'estaven produint reflexions de l'interior i de l'exterior de l'edifici.

A continuació s'exposa la secció constructiva de la façana Oest, on es pot comprovar el canvi de solució constructiva en la zona inferior de les finestres, referent al punt 5 de la imatge infraroja:

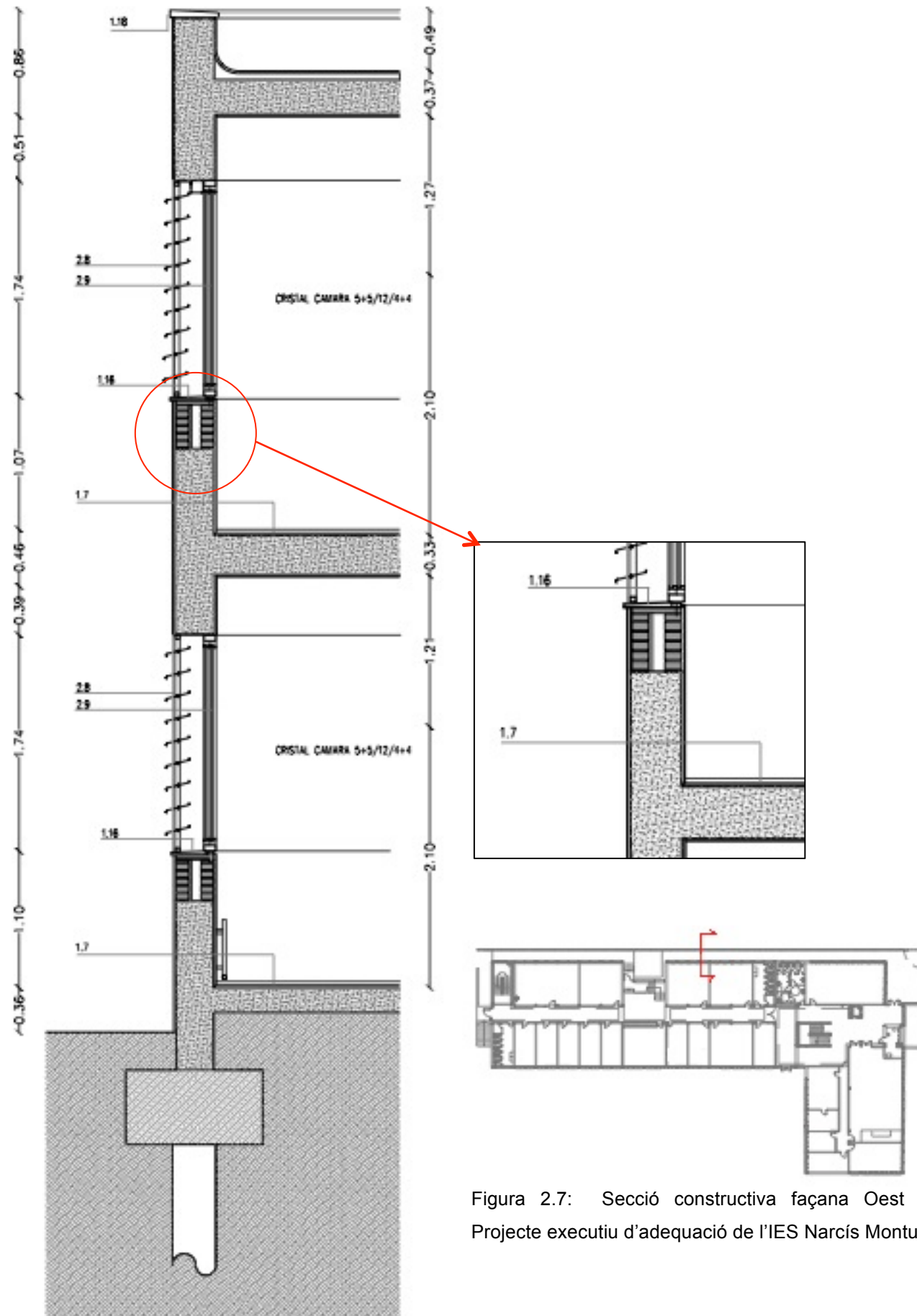


Figura 2.7: Secció constructiva façana Oest (Font: Projecte executiu d'adequació de l'IES Narcís Monturiol)

Seguidament es presenta un histograma del rectangle 1 i un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels):

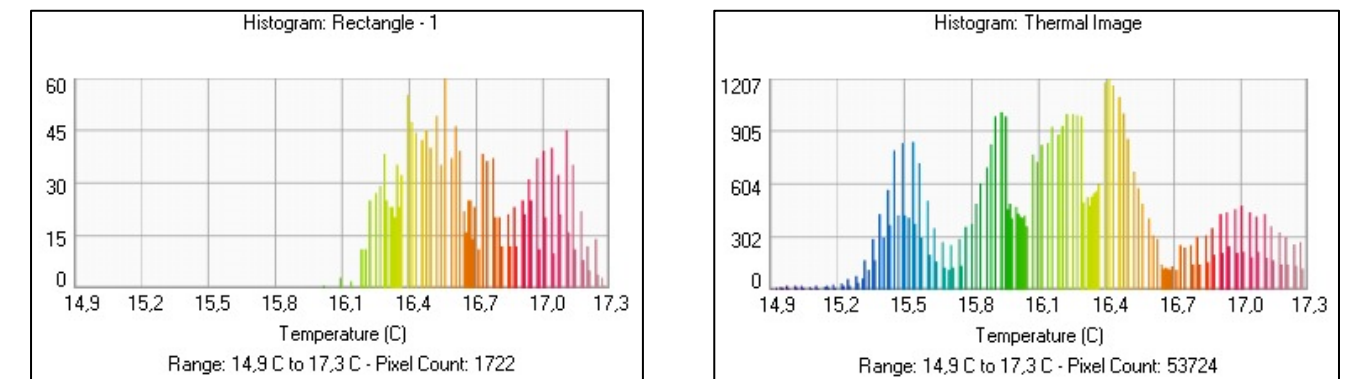


Figura 2.8: Histogrammes de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

A continuació s'exposa una imatge en 3D corresponent al termograma, on es poden detectar les diferents temperatures amb més facilitat:

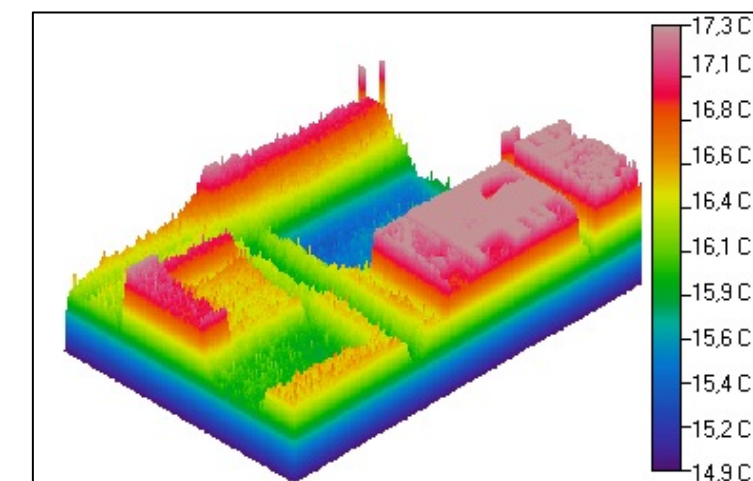
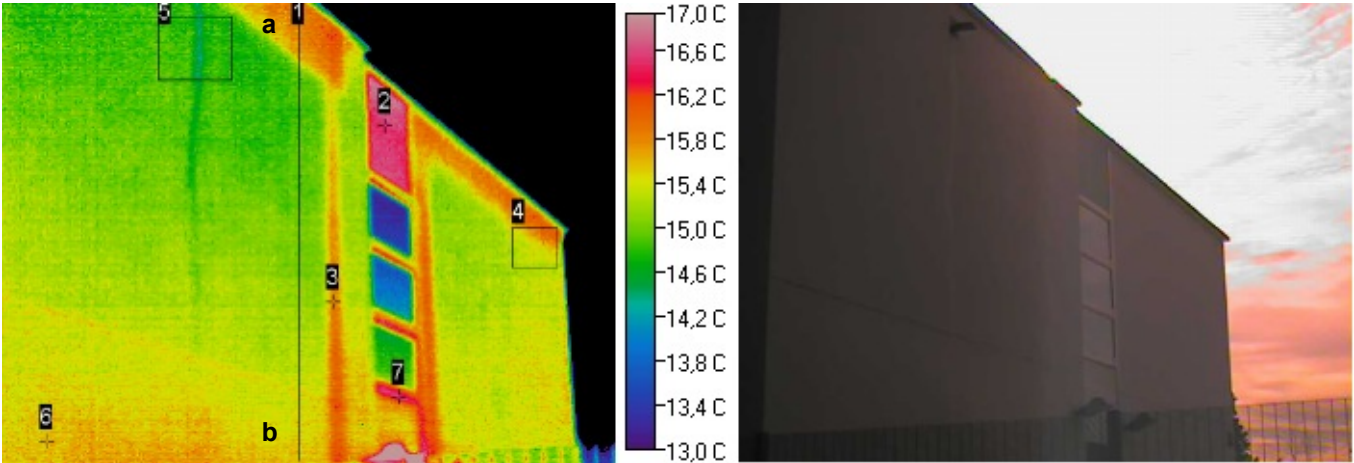
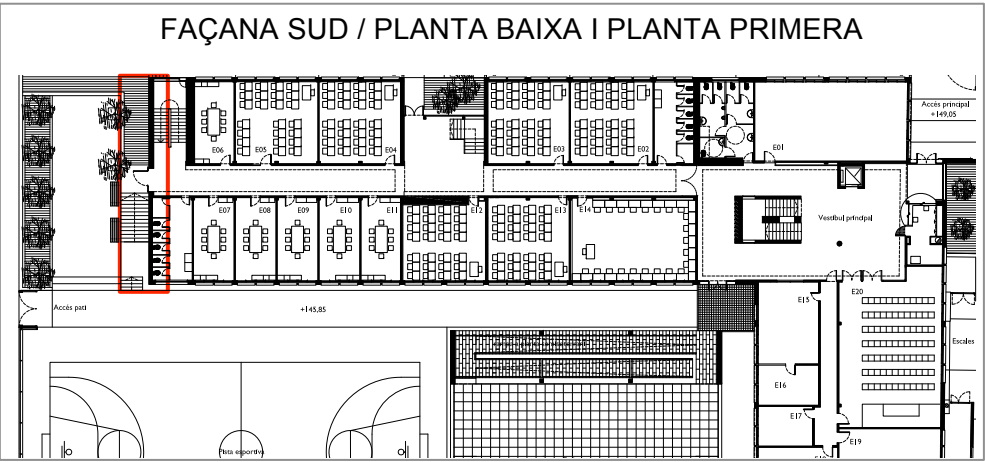


Figura 2.9: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 7:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	14,3 °C	15,6 °C	14,9 °C	0,93	19,4 °C	15 m	4,13 m
2	-	16,6 °C	-	-	19,4 °C	15 m	-
3	-	15,6 °C	-	0,93	19,4 °C	15 m	-
4	14,8 °C	16 °C	15,2 °C	0,93	19,4 °C	15 m	0,16 m ² /5,54
5	13,8 °C	14,8 °C	14,5 °C	0,93	19,4 °C	15 m	0,42m ² /16,36
6	-	15,4 °C	-	0,93	19,4 °C	15 m	-
7	-	15,7 °C	-	0,77	19,4 °C	15 m	-

Aquest termograma ens mostra les diferents temperatures que podem trobar en la façana Sud de l'edifici. Per poder analitzar correctament la imatge infraroja, cal tenir present que ens trobem a primera hora del matí, i que la façana Sud no està radiant l'energia absorbida durant el dia. El tancament presenta una distribució irregular de temperatura, possiblement degut a humitat retinguda per la façana.

La part superior de la façana (àrea 4) i el punt 3, es troben a temperatura molt elevada a diferència de la resta de la façana. Aquest salt tèrmic deduïm que es produeix per la situació del forjat superior, i dels pilars verticals que conformen l'estructura de l'edifici.

L'àrea 5 ens mostra la part superior de la façana, la qual es troba a temperatura baixa, a diferència de la part inferior (punt 6) que es troba a més temperatura. Aquesta divergència tèrmica es pot observar a partir de la línia 1, on seguidament s'exposen els gràfics per facilitar la comprensió:

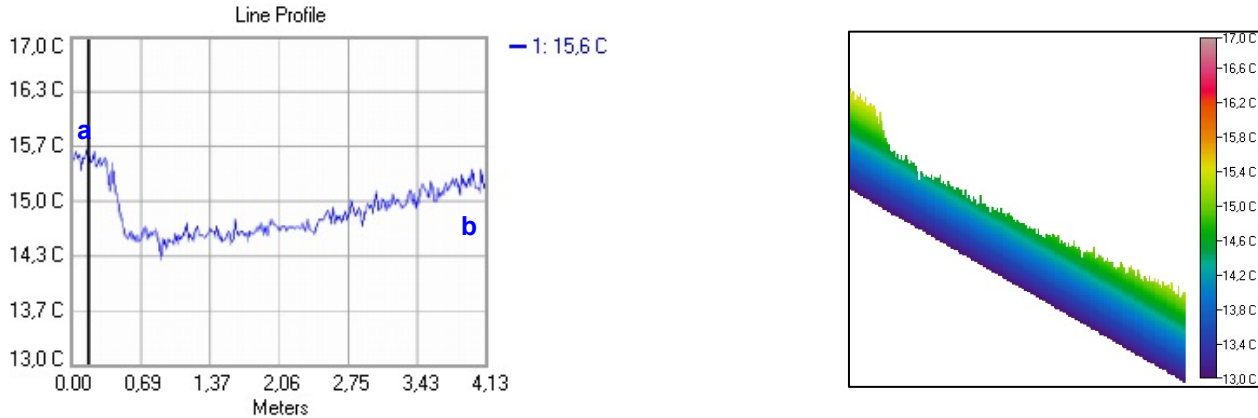
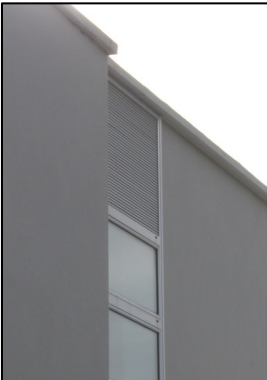


Figura 2.10: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

El punt 2 ens assenyalava una zona que es troba a temperatura màxima de 16,6 °C. Es tracta d'una reixa de ventilació de l'edifici, per on es produeixen exfiltracions d'aire interior cap a l'exterior.

En referència al punt 7, ens indica la fusteria de les finestres per on es produeixen pèrdues energètiques, ja que els perfils no tenen tancament de pont tèrmic.



A continuació, s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels):

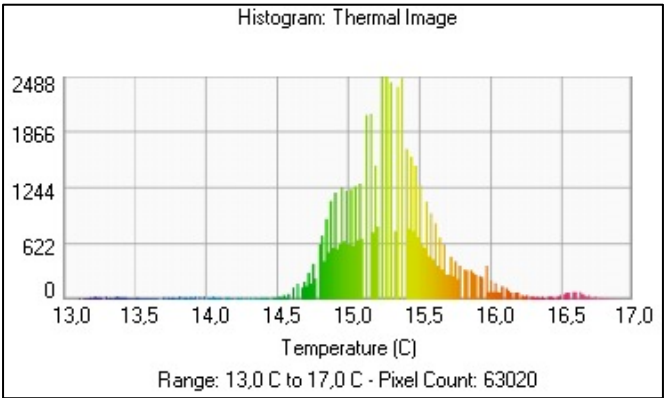
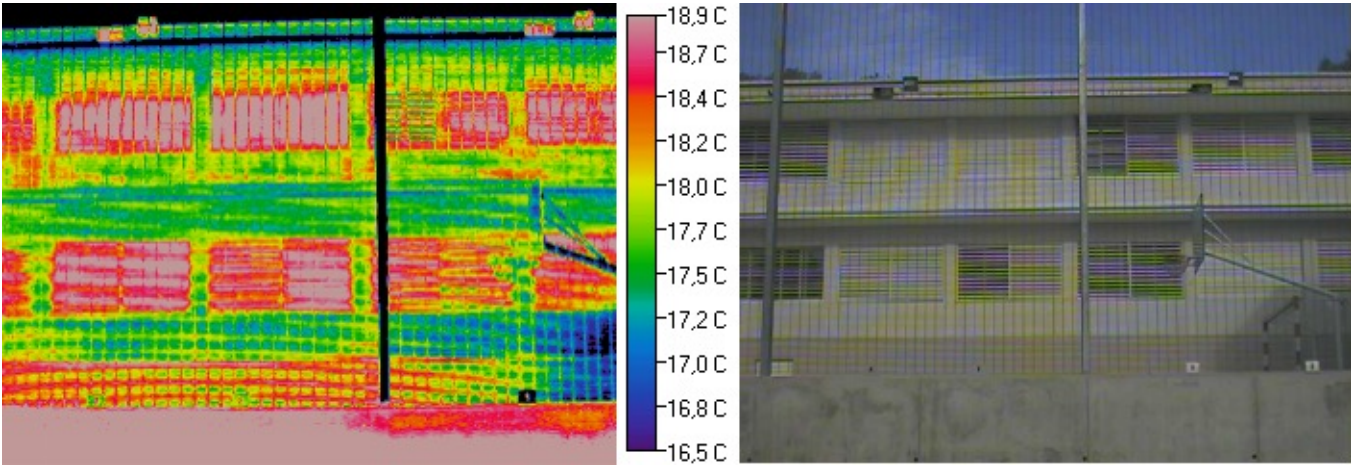
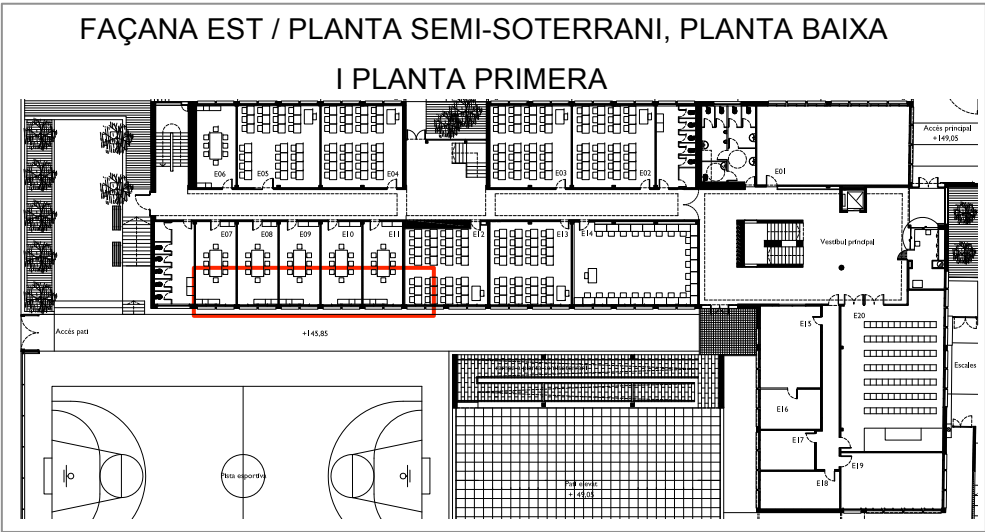


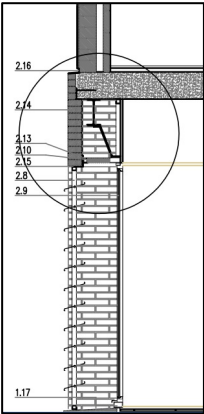
Figura 2.11: Histograma de distribució de Temperatura de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 8:

- Ubicació:

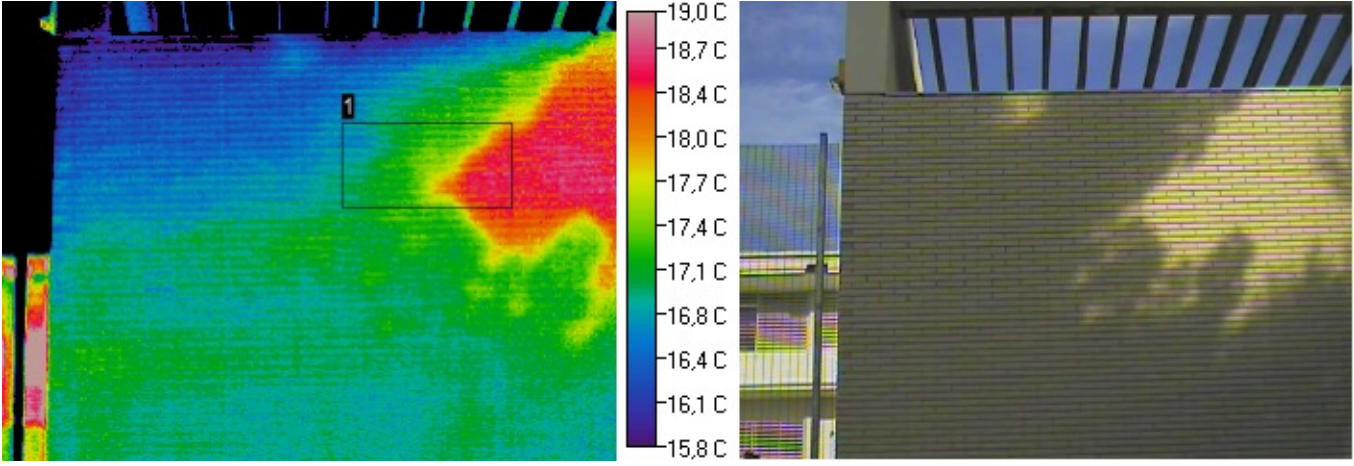
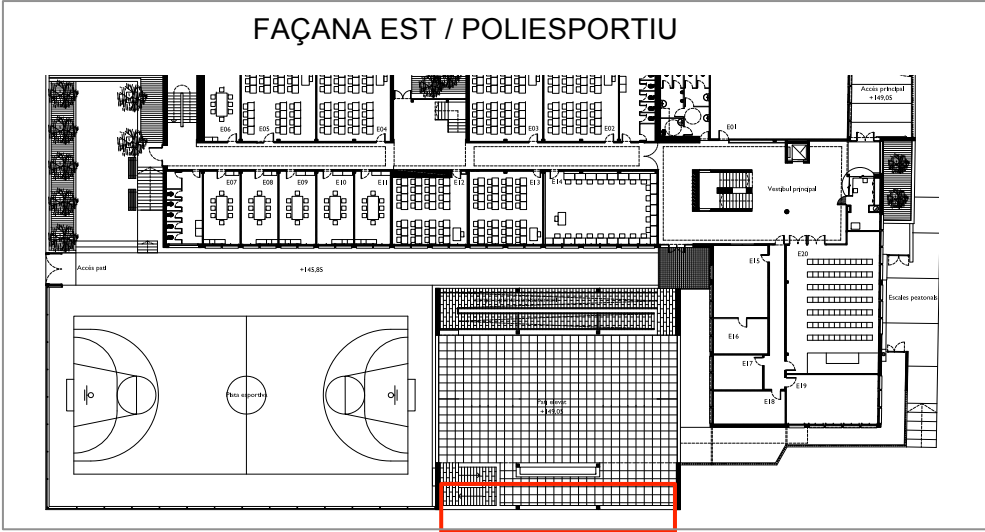


Aquesta imatge correspon a la façana Est, on es pot detectar que els punts més desfavorables en relació a les pèrdues energètiques són les finestres de l'edifici. La part dreta inferior on trobem temperatures més baixes, fa referència a una part de la façana que està ombrejada per una secció de l'edifici que té al davant. Si ens fixem detingudament, podem observar la situació dels voladissos en la part superior de les finestres, els quals protegeixen de les radiacions solars. En aquesta imatge també es pot diferenciar la divergència de material entre la planta baixa i la planta primera, ja que la façana inferior es troba a més temperatura que la superior (veure el detall adjunt), ja que es produeixen més pèrdues energètiques. A la part superior de la imatge s'observen diferents punts a temperatura elevada, que corresponen als fanals que il·luminen el pati.



TERMOGRAMA 9:

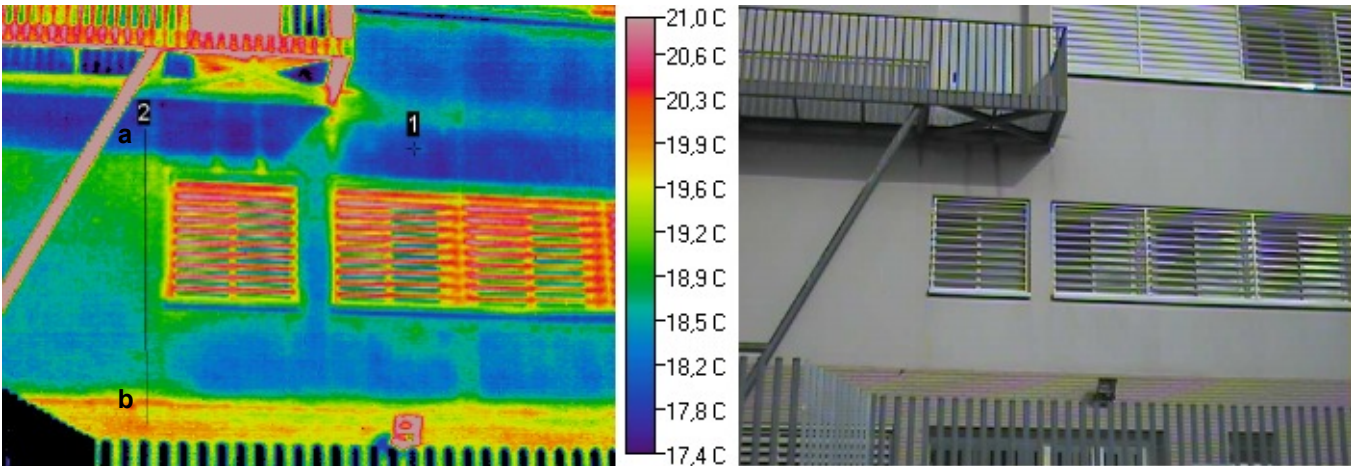
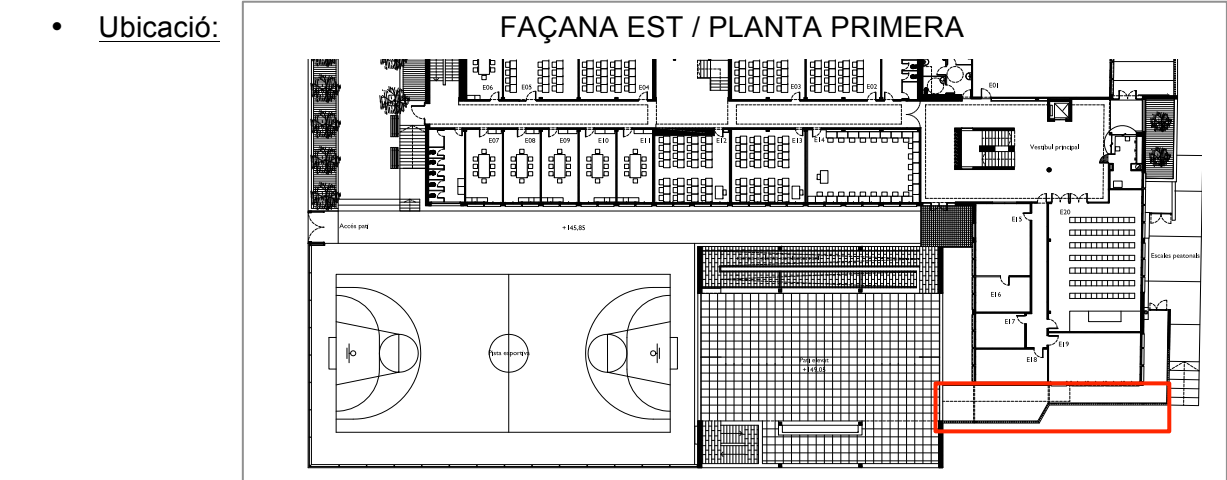
- Ubicació:



Àrea	T°. Mìn	T°. Màx	T°. Mltja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	16,3 °C	18,9 °C	17,4 °C	0,93	18,9 °C	10 m	0,56m ² /6,16

Si ens fixem en la imatge digital i posteriorment en el termograma, podem veure l'efecte de temperatura que genera la radiació solar en el parament del poliesportiu. La zona d'ombra generada per l'arbrat frontal es troba a menys temperatura, mentre que la zona assolellada està a una temperatura més elevada.

TERMOGRAMA 10:



Línia/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	-	17,8 °C	-	0,93	19 °C	8 m	-
2	17,9 °C	20,2 °C	18,9 °C	0,93	19 °C	8 m	1,47 m

Aquesta imatge infraroja corresponent a la façana Est de l'edifici ens facilita informació que a simple vista no podem percebre.

El punt 1 ens indica una zona de la façana, la qual es troba a temperatura molt baixa degut a un excés d'humitat retinguda en el parament. Podem comprovar també el recorregut del forjat, per la diferència de temperatura entre aquest i la façana. Generalment, es poden observar acumulacions d'humitat en aquest punts de la façana: en la part superior i inferior de les finestres i en la part inferior del voladiu, el qual provoca ombra en la façana, i provoca disminució de temperatura en la façana. Gràcies a la Termografia, també podem identificar el canvi de material entre la planta primera (acabat de morter

monocapa), i la planta baixa (acabat amb obra de fàbrica, veure figura 2.12), el qual es troba a una temperatura molt elevada.

A continuació s'exposa un detall de la trobada entre la façana de la planta baixa i la façana de la planta primera, on s'observen les diferents solucions constructives, que ajuden a entendre les diferències tan grans de temperatura que es poden observar en la imatge termogràfica. Amb la línia 2, es vol demostrar els salts tèrmics que es van produint ver la façana, així com el canvi de temperatura entre aquestes dues plantes, que tenen una solució de façana diferent:

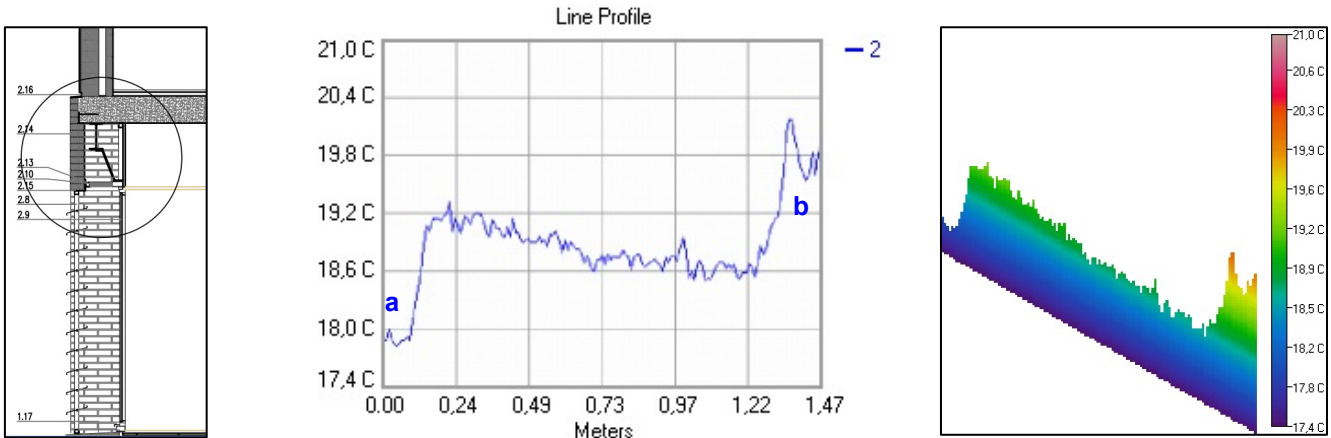


Figura 2.12: Detall secció façana planta baixa i planta primera (Font: Memòria Constructiva Edifici) . Gràfic línia 2 i perfil del comportament tèrmic línia 2 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

A continuació s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D del termograma:

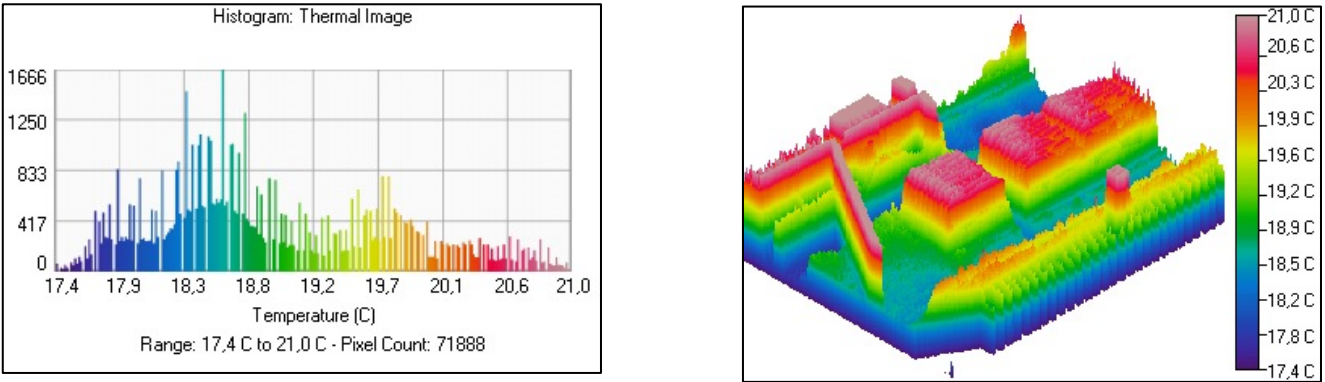
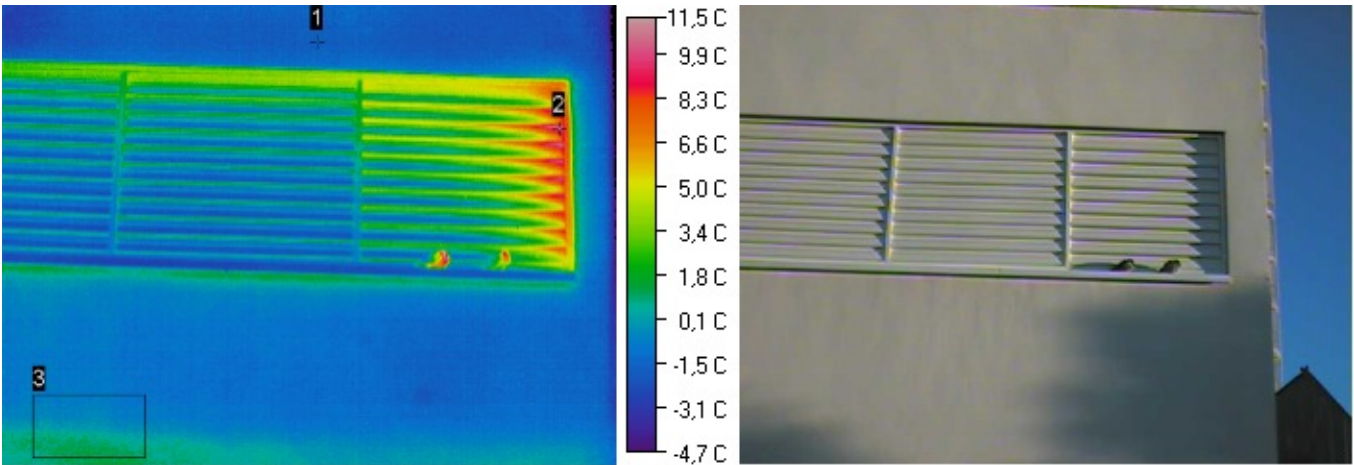
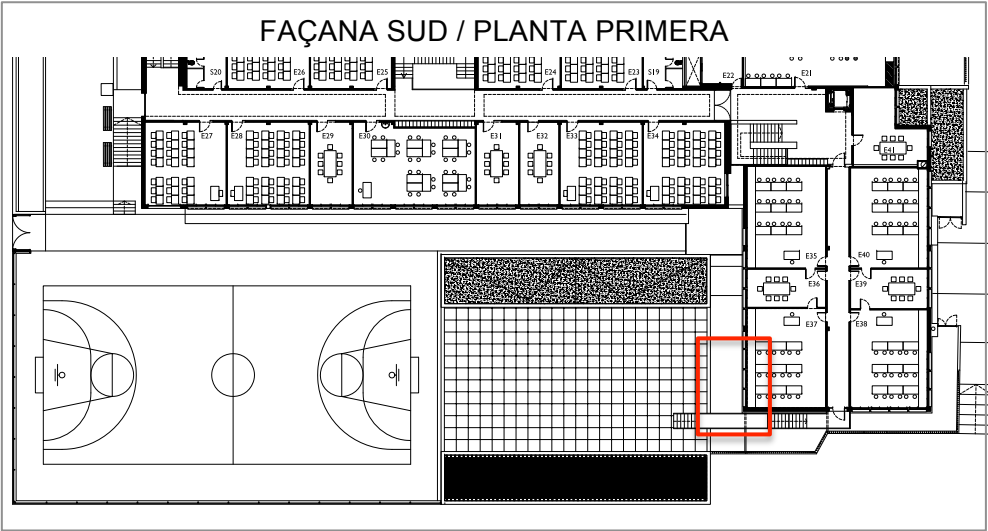


Figura 2.13: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

ANÀLISI TERMGRÀFIC REALITZAT AL MES DE DESEMBRE (04 / 12 / 2012):

TERMOGRAMA 1:

- Ubicació:



Àrea/Punt	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-	-1,4 °C	-	0,93	9 °C	10 m	-
2	-	11,1 °C	-	0,77	9 °C	10 m	-
3	-1,2 °C	1,7 °C	0,2 °C	0,93	9 °C	10 m	0,28m ² /19,60

En aquest termograma es pot observar la temperatura de la façana Sud i de les lamel·les de les finestres. El punt 1 ens indica la temperatura general de la façana, la qual és molt baixa, ja que la temperatura ambiental exterior és molt inferior, i la temperatura interior de l'edifici encara no es veu reflectida en la façana, ja que la calefacció fa una hora i mitja que està en funcionament. Tot i això, en les zones més crítiques si que podem observar canvis de temperatura. En el punt 2 per exemple, podem detectar una zona de la fusteria de la finestra, la qual es troba a temperatura elevada i per on

s'estan produint pèrdues energètiques, degut a que la temperatura interior és de 19 °C i la temperatura exterior de 9 °C, i la temperatura en aquest punt és de 11,1°C.

En l'àrea 3 que es mostra en la imatge termogràfica, també s'observa dèbilment una pujada de temperatura en comparació amb la resta de la façana. Tot i que els valors de temperatura encara no són estables degut a que no es reflecteix tota la calor en els paraments, sí que es poden observar els ponts tèrmics que existeixen.

En aquest cas podem detectar un pont tèrmic en el front de forjat per on s'estan produint dissipacions energètiques. Aquest fet és degut a que no existeix aïllament en el cantell del forjat el que provoca un pont tèrmic en el parament (veure figura 2.15).

A continuació s'exposa un histograma corresponent al rectangle 3 i a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), també es mostra un detall de la secció de la façana i una imatge en 3D del termograma

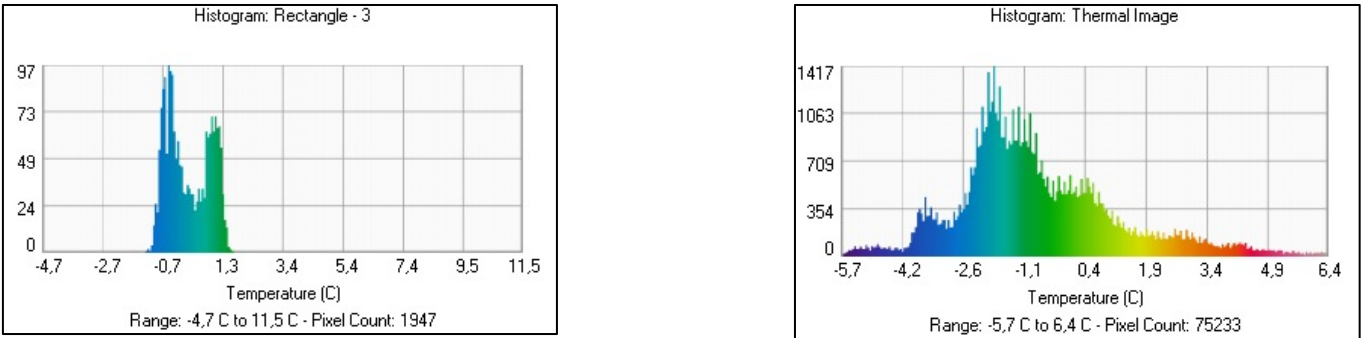


Figura 2.14: Histogrames de distribució del rectangle 3 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

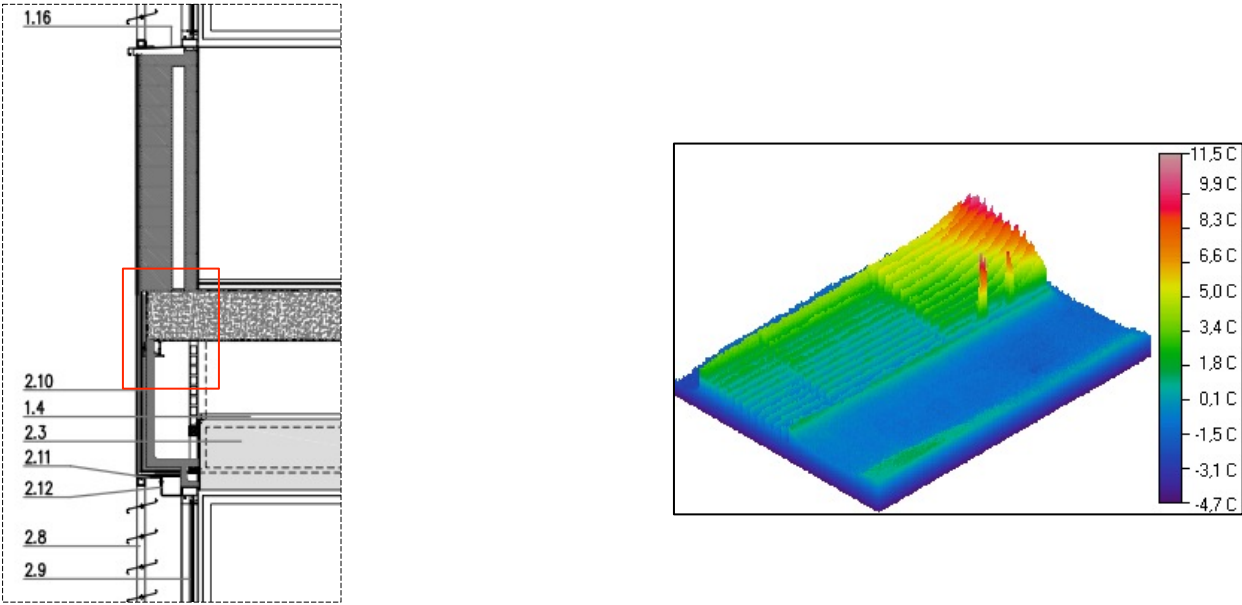


Figura 2.15: Detall trobada forjat amb façana i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Projecte executiu d'adequació de l'IES Narcís Monturiol, i imatge en 3D elaborada pròpiament amb software Image Processors Pro II).

TERMOGRAMA 2:

- Ubicació:

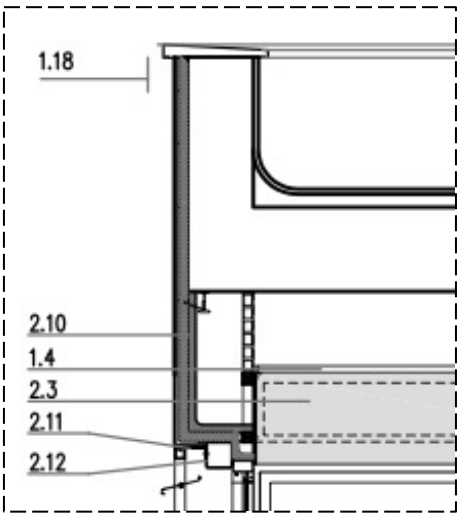
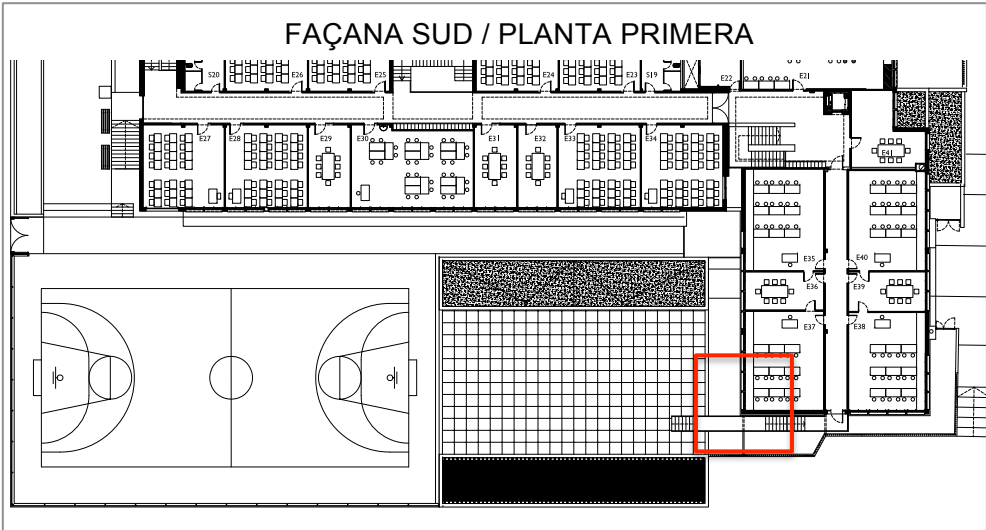
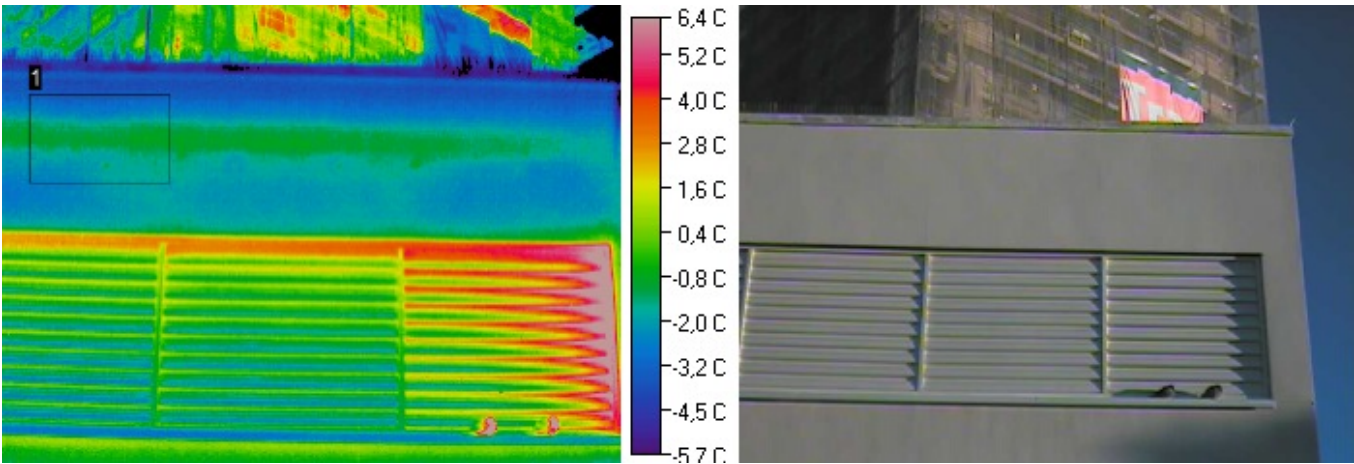


Figura 2.16: Detall trobada mur de coronació de la façana Sud amb coberta. (Font: Projecte executiu d'adequació de l'IES Narcís Monturiol).



Àrea	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-2 °C	1,3 °C	-0,1 °C	0,93	9 °C	10 m	0,48 m ² /34,01

Aquest termograma fa referència a la mateixa façana anterior, però enfocant la part superior del parament, on podem observar un canvi de temperatura interessant.

Si ens fixem en l'àrea 1 podem detectar un augment dèbil de temperatura en relació amb la resta de la façana, corresponent al cantell de l'últim forjat de coberta. Podem preveure que aquest augment de temperatura és degut a una deficient solució constructiva, lo qual ha generat un pont tèrmic a tenir present en l'estudi energètic d'aquest edifici. Cal tenir present que la coberta no té aïllament, comportant pèrdues energètiques també per aquesta part de l'edifici.

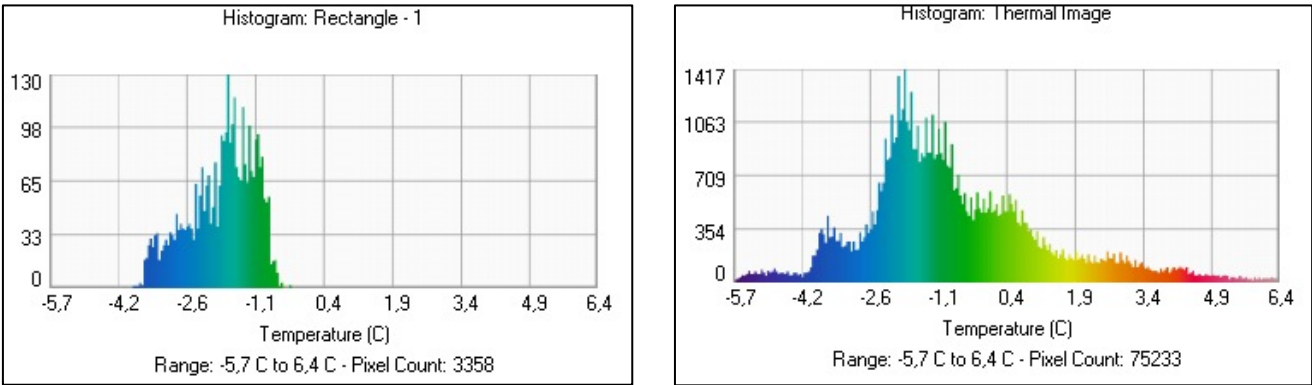


Figura 2.17: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

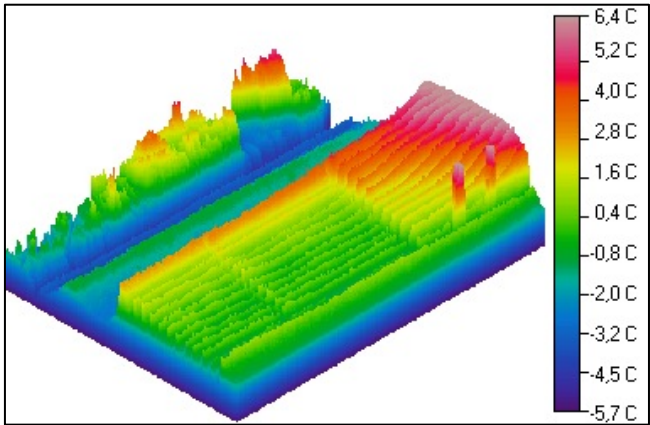
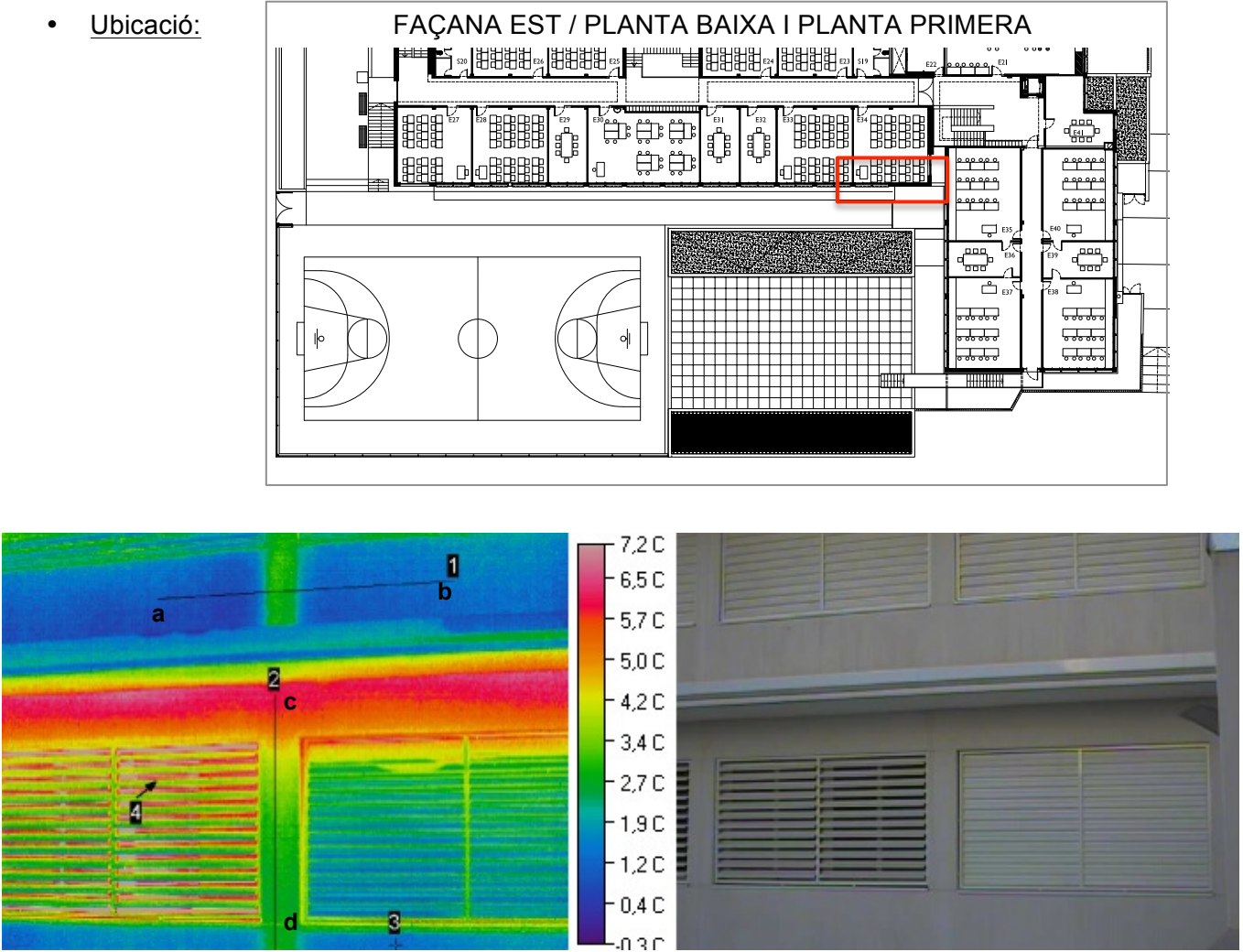


Figura 2.18: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 3:



Línia/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	0,1 °C	3,1 °C	1 °C	0,93	5,5 °C	15 m	3,02 m
2	2,2 °C	6,3 °C	3,5 °C	0,93	5,5 °C	15 m	2,61 m
3	-	0,7 °C	-	0,93	5,5 °C	15 m	-

En aquest termograma la línia 1 ens indica la zona inferior de les finestres la qual es troba a menys temperatura que la resta de la façana. Aquest fet és degut a que en la reforma realitzada a l'any 2004, es van disminuir les dimensions de les finestres, i es va resoldre el buit amb una façana de doble fulla amb càmera d'aire, la qual ens dóna més prestacions i és el motiu pel qual aquests punts no es troben a la mateixa temperatura que la resta de la façana. Amb la línia 1 s'ha volgut mostrar aquest salt tèrmic de passar d'una façana de mur de formigó a la façana de doble fulla amb càmera d'aire. La línia 2 ens indica el canvi de temperatura que pateix la façana en planta baixa des del forjat superior a la zona inferior a les finestres. Aquesta zona superior de les finestres que es troba a temperatura elevada és

deguda a que la temperatura interior s'escapa per aquesta part de formigó, la qual no té càmera d'aire ni aïllament, ja que es tracta de la part antiga de l'edifici (veure figura 2.19). El punt 3 ens mostra el mateix cas anterior de reducció de les dimensions de les finestres a l'any 2004 on es va construir una façana amb doble fulla i càmera, motiu que explica el descens de temperatura. I finalment la fletxa 4 ens mostra l'efecte de les lamel·les de les finestres obertes, a diferència de la finestra dreta on les lamel·les estan tancades, però no podem valorar l'efecte de temperatura ja que el vidre ens genera mesures confuses degut a la reflexió.

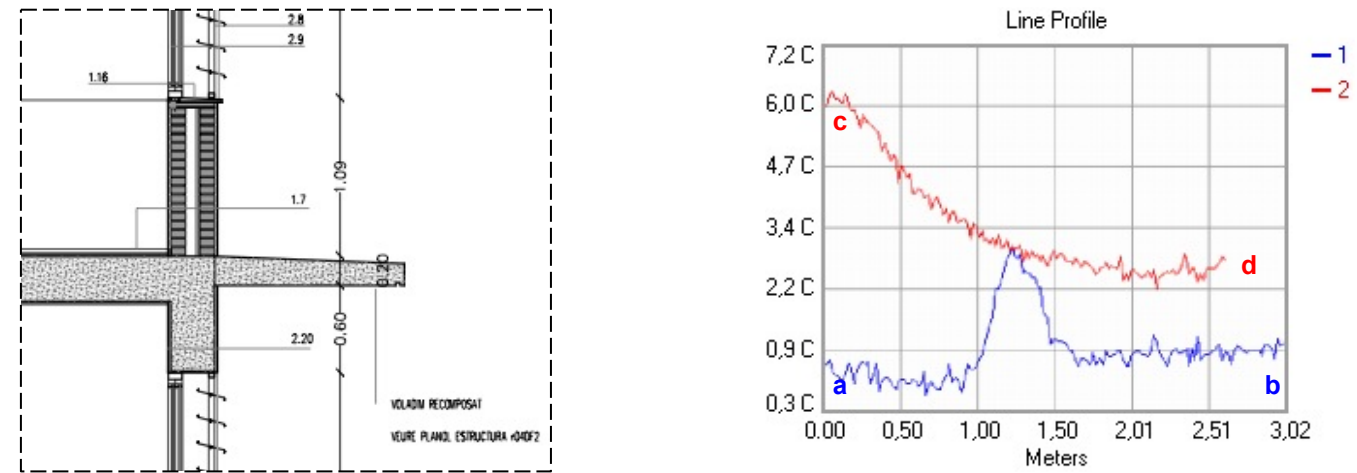


Figura 2.19: Detall secció constructiva façana i gràfic línia 1 i 2 (Font: Projecte executiu d'adequació de l'IES Narcís Monturiol i gràfic elaborat pròpiament amb software Image Processor Pro II)

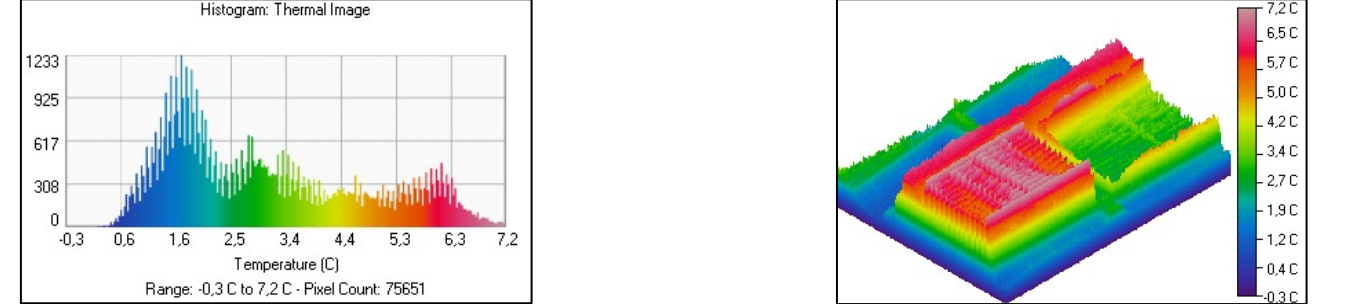
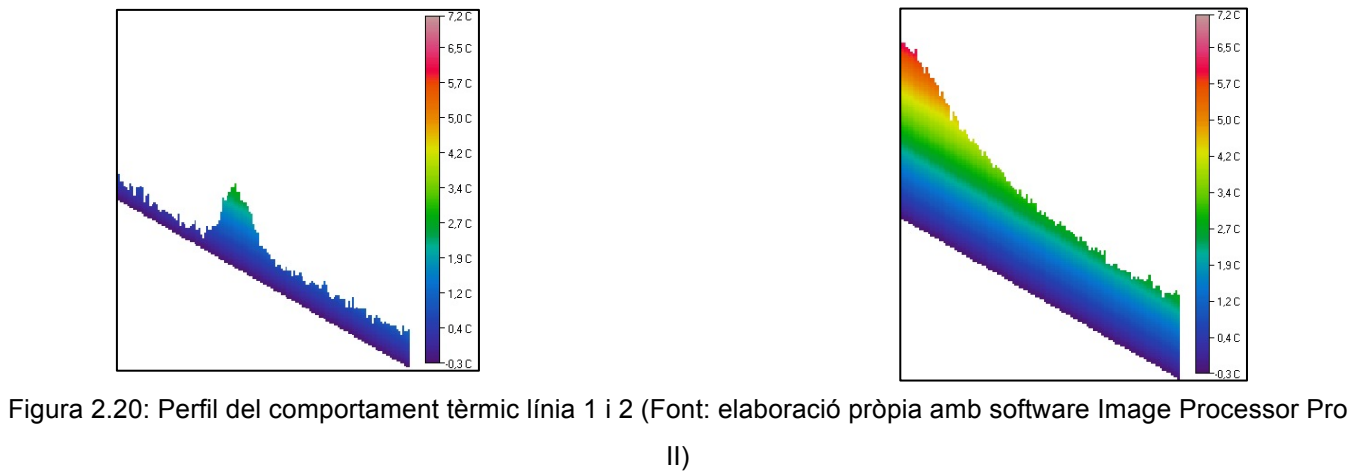
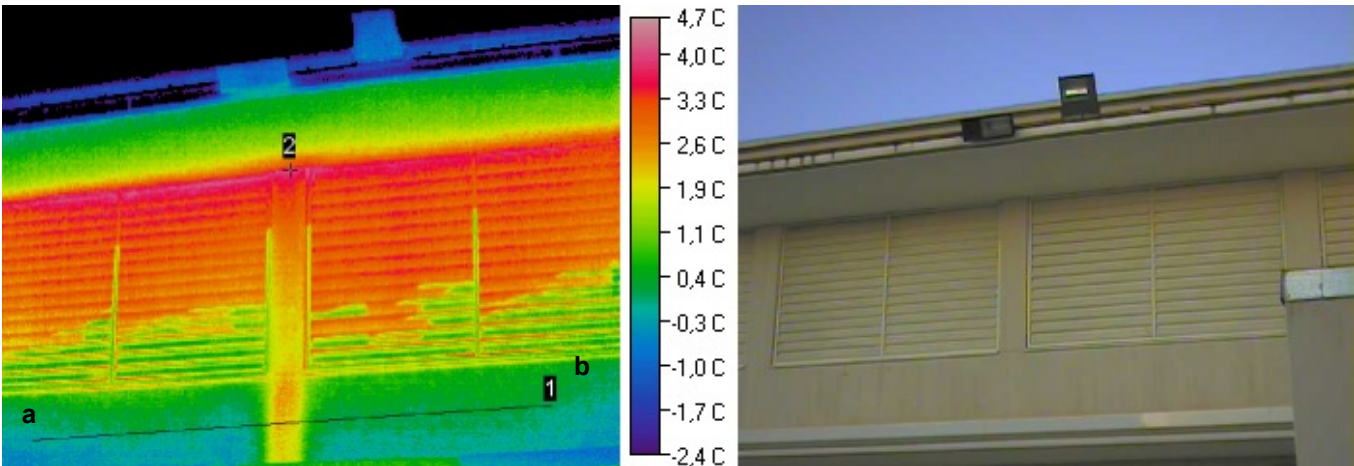
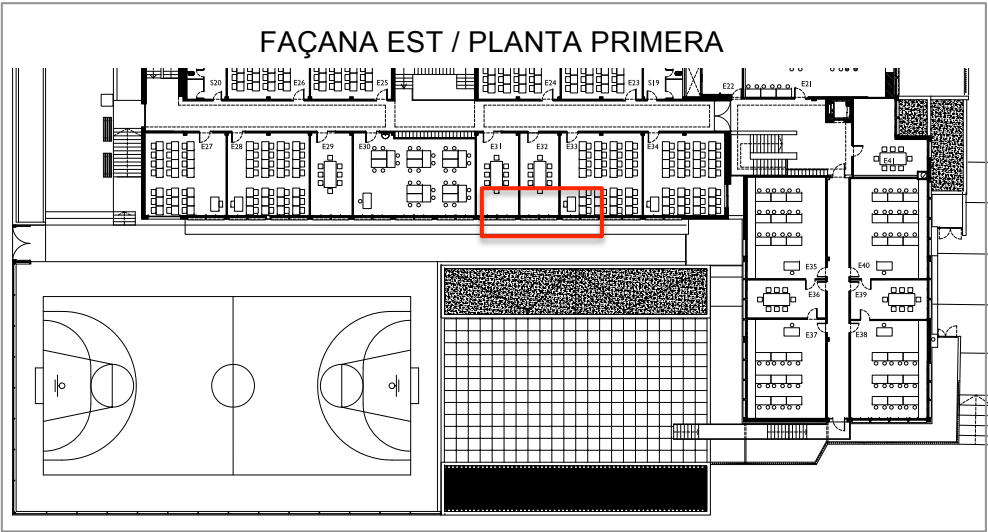


Figura 2.21: Histograma de la Imatge infraroja i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 4:

- Ubicació:



Línia/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	-0,8 °C	2,1 °C	-0,1 °C	0,93	5,5 °C	15 m	4,83 m
2	-	4 °C	-	0,93	5,5 °C	15 m	-

En aquest termograma la línia 1 ens indica el mateix cas anterior, es tracta de la part de parament afegit (que correspon a una façana de doble fulla amb càmera) que es va realitzar a la reforma de l'any 2004 per reduir les dimensions de les finestres. Es pot observar la diferència d'aquest parament, amb els pilars o part del mur de formigó, les quals es troben temperatura més elevada. En el gràfic següent corresponent a la línia 1, es mostra de forma més visible aquest salt tèrmic, entre la part nova afegida i l'estructura antiga, o parament antic.

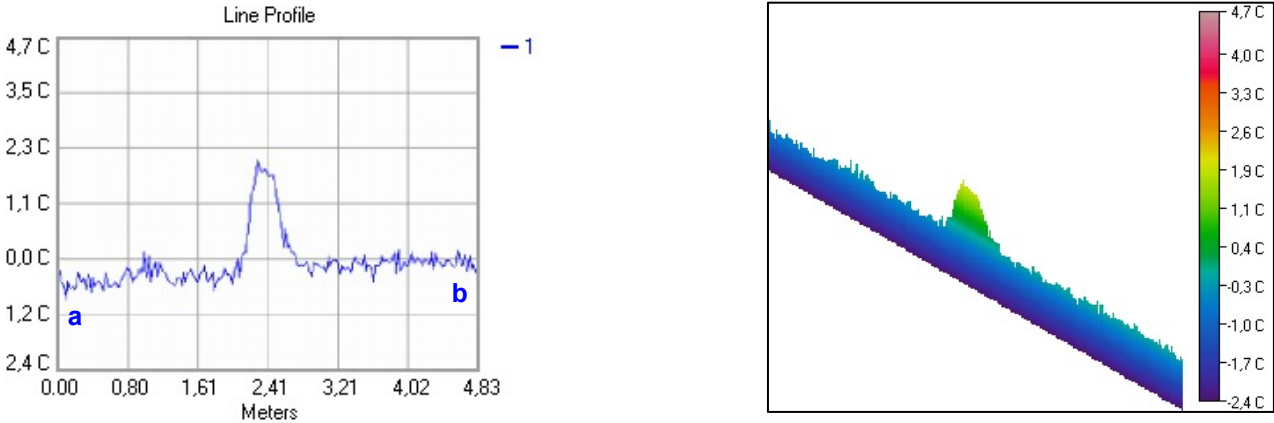


Figura 2.22: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

El punt 2 correspon a la trobada de entre el voladiu i el parament de façana, per on existeix un pont tèrmic important, ja que la temperatura és elevada.

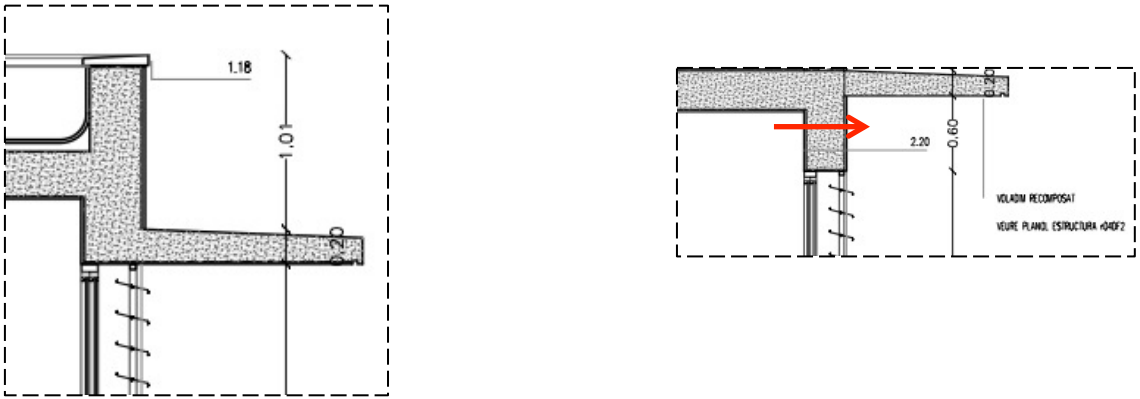


Figura 2.23: Detall trobada parament de façana amb voladiu. (Font: Projecte executiu d'adequació de l'IES Narcís Monturiol).

A continuació s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), també es mostra una imatge en 3D del termograma:

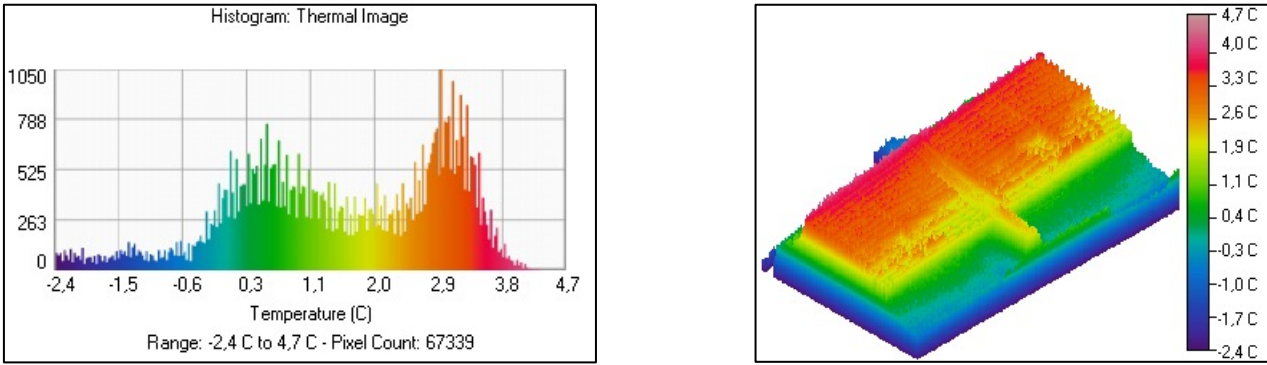
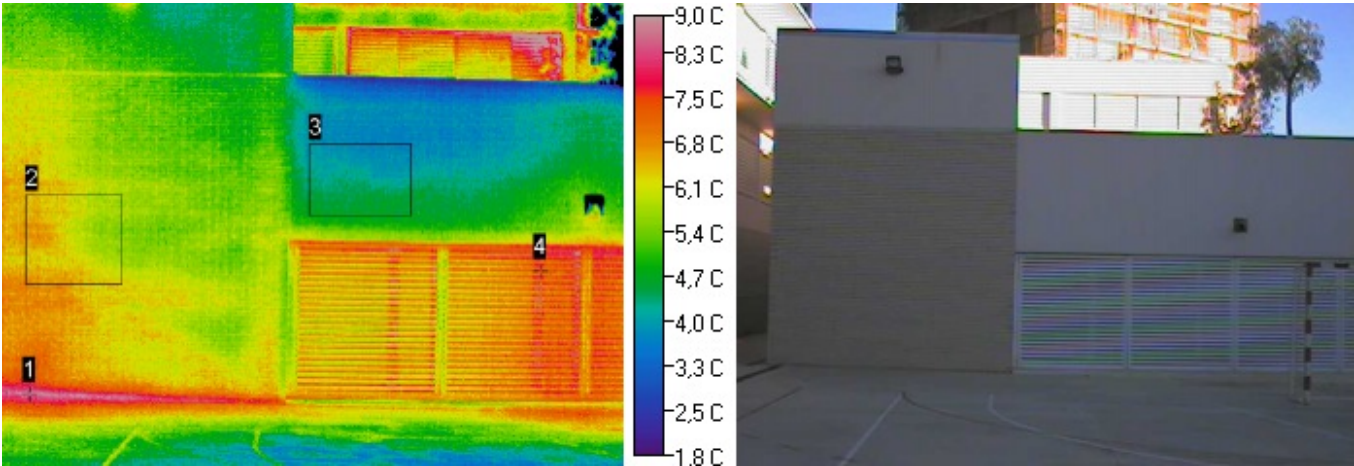
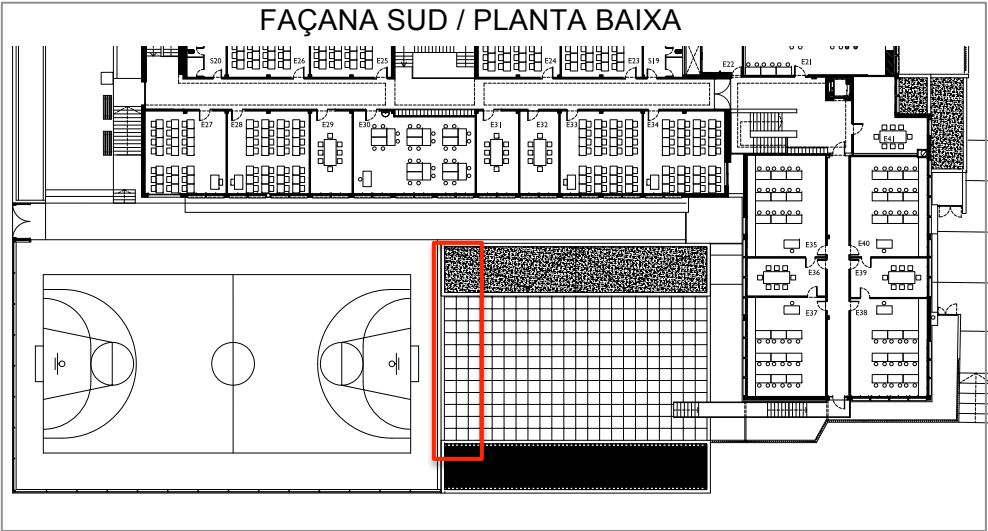


Figura 2.24: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 5:

- Ubicació:



Àrea/Punt	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-	9 °C	-	0,93	5,5 °C	7 m	-
2	5,3 °C	7,2 °C	6,3 °C	0,93	5,5 °C	7 m	0,16m²/0,86
3	3,3 °C	5 °C	4,2 °C	0,93	5,5 °C	7 m	0,14m²/1,29
4	-	8,5 °C	-	0,93	5,5 °C	7 m	-

Aquesta façana es va construir a la reforma de l'any 2004 i correspon a la part del gimnàs de l'escola on es realitzen les activitats esportives. Tot i ser un parament relativament nou compost per doble fulla i càmera podem observar irregularitats tèrmiques en tot el parament. En primer lloc el punt 1 ens indica el pont tèrmic que es genera en la trobada entre el terra del pati (cota 0,0) i el parament de façana. Es tracta d'una zona per on s'estan produint pèrdues energètiques importants, i les quals podem visualitzar ja que la temperatura exterior és de 5,5 °C, la temperatura interior és de 20 °C

aproximadament (ja que es tracta d'una zona ocupada on s'estaven produint activitats esportives en el moment de la presa del termograma, i les lluminàries es trobaven en funcionament les quals desprenen calor a nivells elevats. L'àrea 2 ens mostra les diferents temperatures que trobem en la façana, la manca d'aïllament genera aquestes irregularitats tèrmiques, i provoca que les zones on la temperatura interior és més elevada tant per la seva ocupació com pel seu ús, es vegi reflectida en el tancament. L'àrea 3 ens indica una zona de la façana on la temperatura disminueix degut a un excés d'humitat. Es tracta de la zona en contacte amb la coberta, i entenem que el problema d'aquesta retenció és degut a temes relacionats amb la impermeabilització de la coberta. En relació al punt 4, ens assenyalen les lamel·les de protecció dels finestrals del poliesportiu els quals es troben a més temperatura degut a la reflexió dels vidres.

A continuació s'exposa un histograma corresponent al rectangle 2 i 3, i a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), també es mostra una imatge en 3D del termograma:

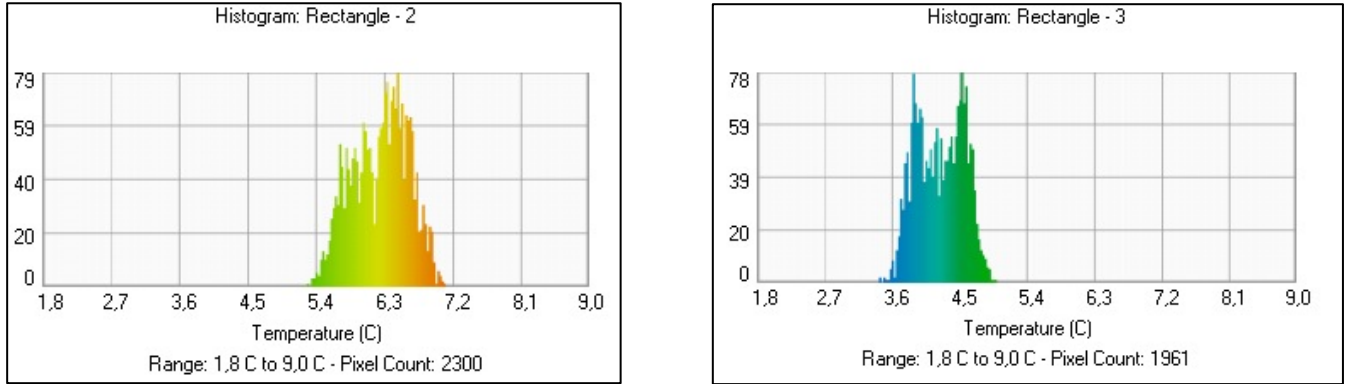


Figura 2.25: Histogrames de distribució del rectangle 2 i 3 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

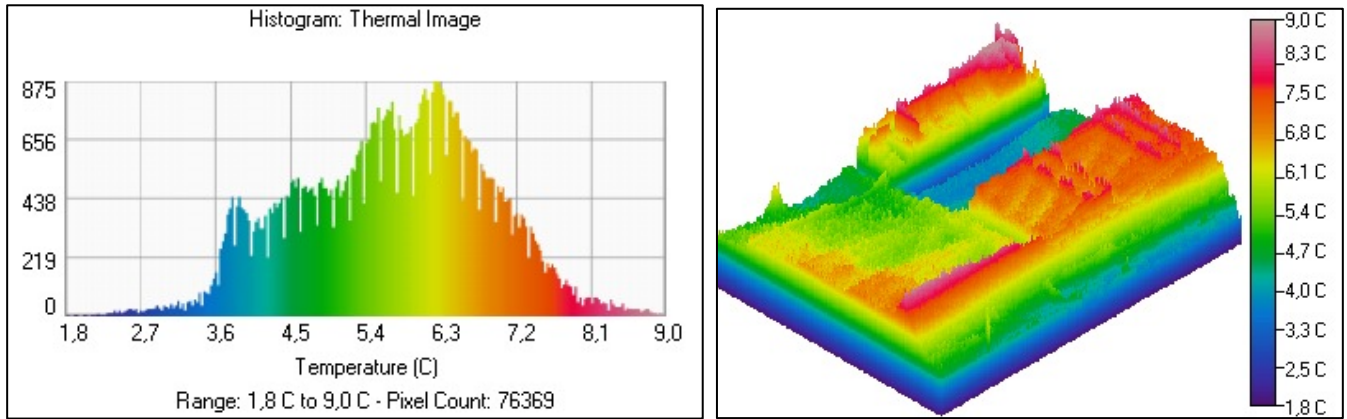
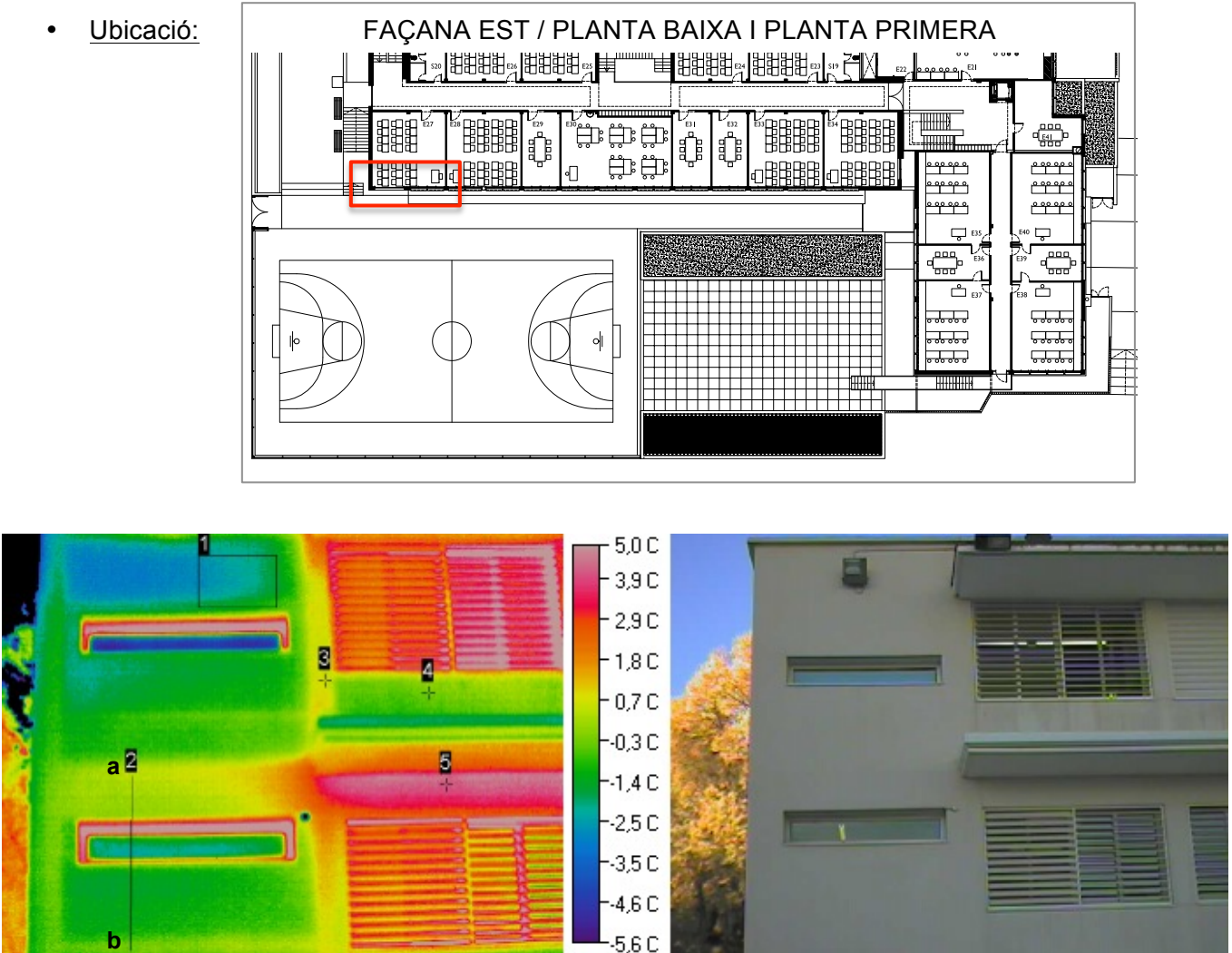


Figura 2.26: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 6:



Àrea/Punt/ Línia	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	-3,7 °C	-1,1 °C	-2,7 °C	0,93	7 °C	15 m	0,44m ² /32,40
2	-3 °C	5,8 °C	-0,8 °C	0,93	7 °C	15 m	1,80 m
3	-	0,5 °C	-	0,93	7 °C	15 m	-
4	-	-0,9 °C	-	0,93	7 °C	15 m	-
5	-	4,1 °C	-	0,93	7 °C	15 m	-

En aquesta imatge l'àrea 1 ens mostra una part de la façana on existeix humitat retinguda degut a la irregularitat de solucions constructives existents en la façana per la reforma realitzada a l'any 2004. Les finestres de la part esquerra de la imatge corresponen a les obertures de la caixa d'escala de l'edifici. Aquestes obertures també van ser reduïdes durant la reforma, i aquesta actuació es pot veure reflectida en la imatge. La línia 2 vol mostrar les diferents temperatures que existeixen en aquesta zona

de la façana. Cal destacar que existeix un pont tèrmic important en les fusteries d'aquestes finestres les quals no estan dissenyades contra trencament de pont tèrmic. El punt 3 ens assenyalava el pas del pilar, zona la qual es troba a més temperatura, per la deficient solució constructiva en temes d'aïllament de cantell dels pilars. El punt 4 també correspon a una reducció de les finestres, i el punt 5 correspon a la part superior de les finestres per on es produeixen pèrdues energètiques, ja que es tracta d'una via de sortida de la calor interior degut a que l parament d'aquesta zona no té aïllament ni càmera d'aire.

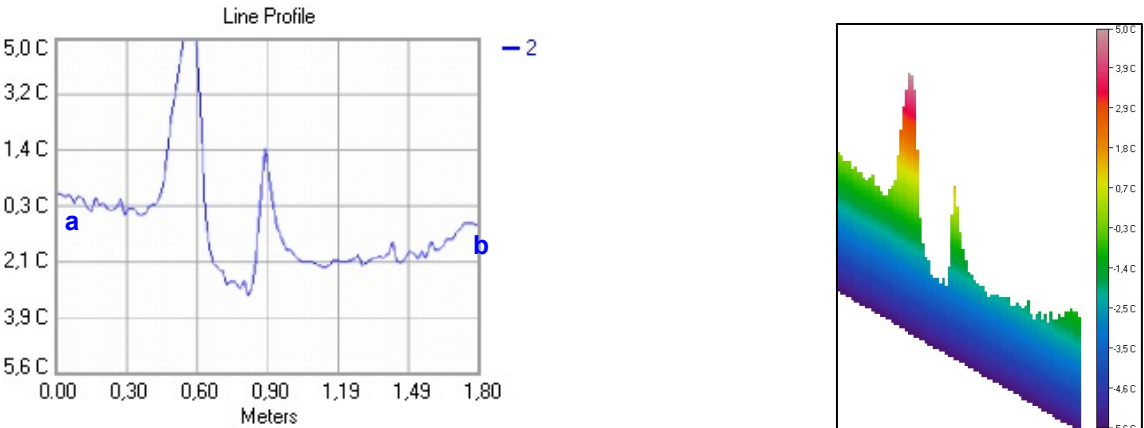


Figura 2.27: Gràfic línia 2 i perfil del comportament tèrmic línia 2 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

A continuació s'exposa un histograma corresponent al rectangle 1 i a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), també es mostra una imatge en 3D del termograma:

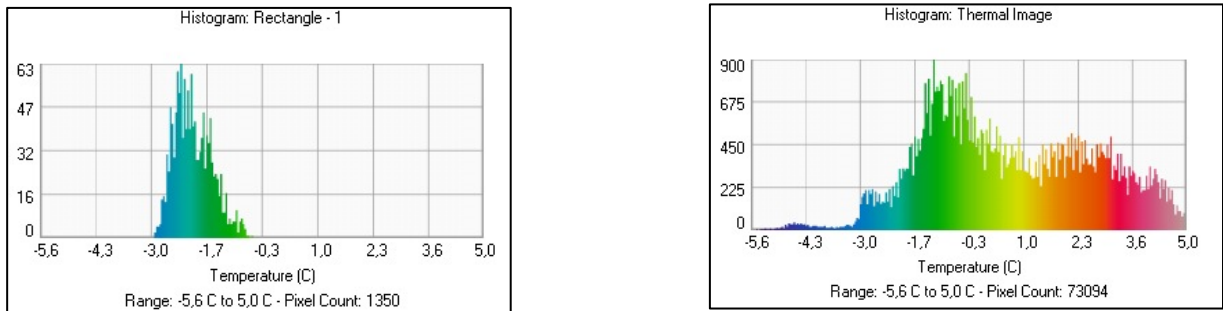


Figura 2.28: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

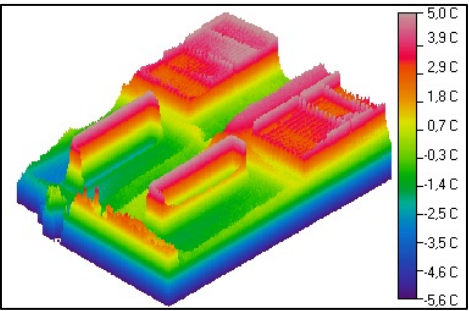
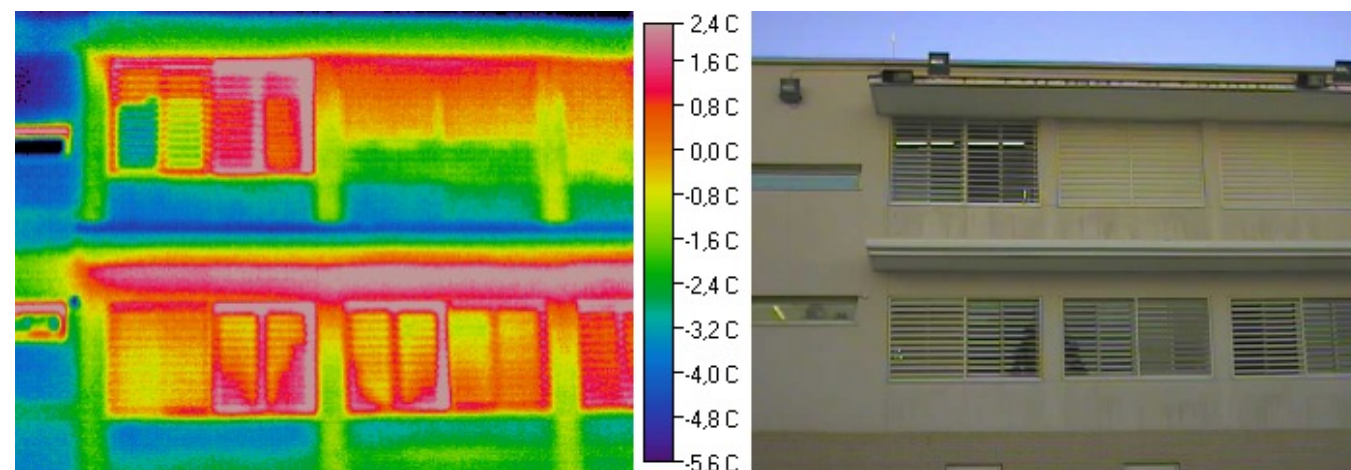
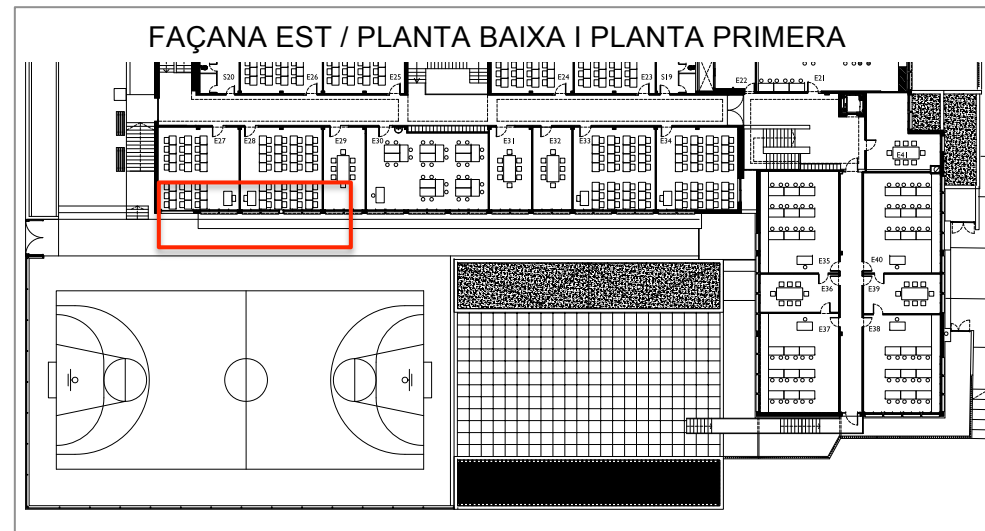


Figura 2.29: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 7:

- Ubicació:



Aquesta imatge és una visió general de la façana Est, la qual s'ha analitzat anteriorment per parts per tal de visualitzar amb més detall les diferències de temperatures i les zones crítiques de la pell de l'edifici.

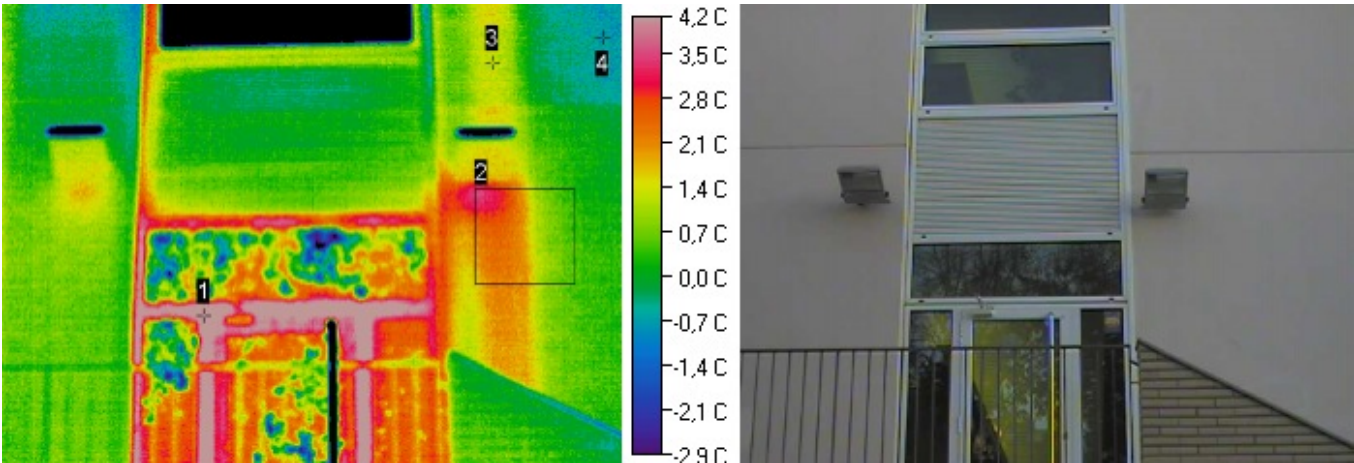
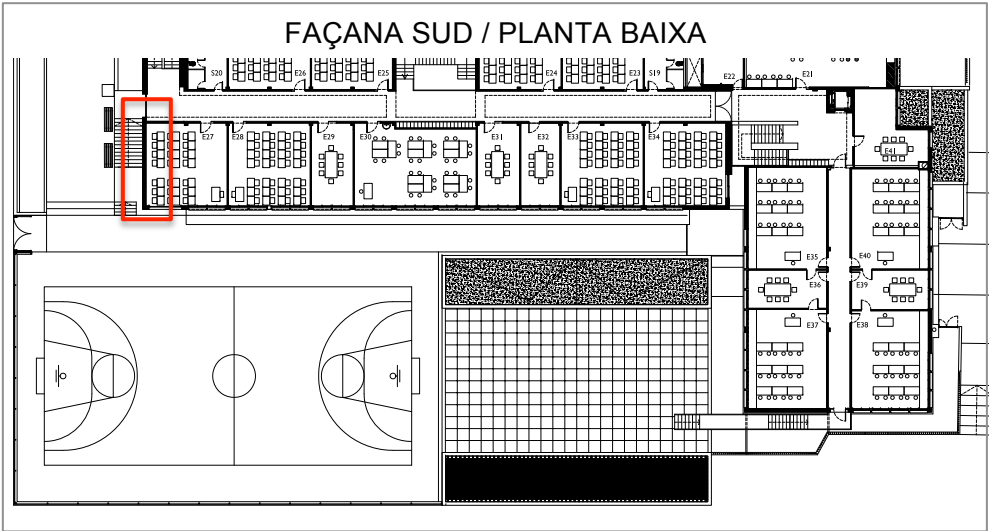
Com es pot observar, es pot visualitzar clarament la reducció de les finestres per la part inferior (analitzada anteriorment), ja que es troba a menys temperatura que la resta de la façana. També podem observar la zona inferior del voladiu (par superior de les finestres de la planta baixa) per on s'escapa la calor interior, ja que es tracta d'una façana de mur de formigó sense aïllament ni càmera d'aire.

En relació a les finestres, podem comprovar que existeix un pont tèrmic, ja que la fusteria no té trencament de pont tèrmic. En referència als vidres, no podem extreure mesures fiables ja que existeixen reflexes que dificulten la correcta obtenció de resultats. En aquesta imatge també podem

visualitzar dos finestres que es troben obertes i per on s'escapa calor interior. Això contribueix a reduir el rendiments dels sistemes de calefacció i conseqüentment a augmentar la demanda.

TERMOGRAMA 8:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-	3,2 °C	-	0,77	9 °C	8 m	-
2	-0,7 °C	3,3 °C	1,2 °C	0,93	9 °C	8 m	0,23m² /14,27
3	-	0,9 °C	-	0,93	9 °C	8 m	-
4	-	-1,6 °C	-	0,93	9 °C	8 m	-

En aquesta imatge infraroja el punt 1 ens mostra les pèrdues energètiques que s'estan produint per la fusteria de les finestres les quals no tenen trencament de pont tèrmic. L'àrea 2 i el punt 3, ens indiquen una zona que es troba a més temperatura a diferència de la resta de la façana, aquest augment de temperatura coincideix amb el recorregut dels pilars de formigó que conformen l'estructura de l'edifici. Es preveu que no existeix aïllament tèrmic pel front dels pilars i per aquest motiu, es genera una via de

sortida de la calor interior cap a l'exterior per la diferència de pressió. Cal remarcar que la temperatura de l'àrea 2 també és deguda a la calor despresada pel fanal superior el qual ha estat en funcionament. En referència al punt 4, el qual es troba a temperatura inferior, es tracta d'una zona amb humitat retinuda degut a la irregularitat de temperatures en la façana per la manca d'aïllament i les diferents solucions constructives existents.

En aquest termograma es pot visualitzar clarament l'efecte que genera els arbres del davant en el vidre, provocant reflexes i mesures errònies.

A continuació s'exposa un histograma corresponent al rectangle 2 i a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), també es mostra una imatge en 3D del termograma:

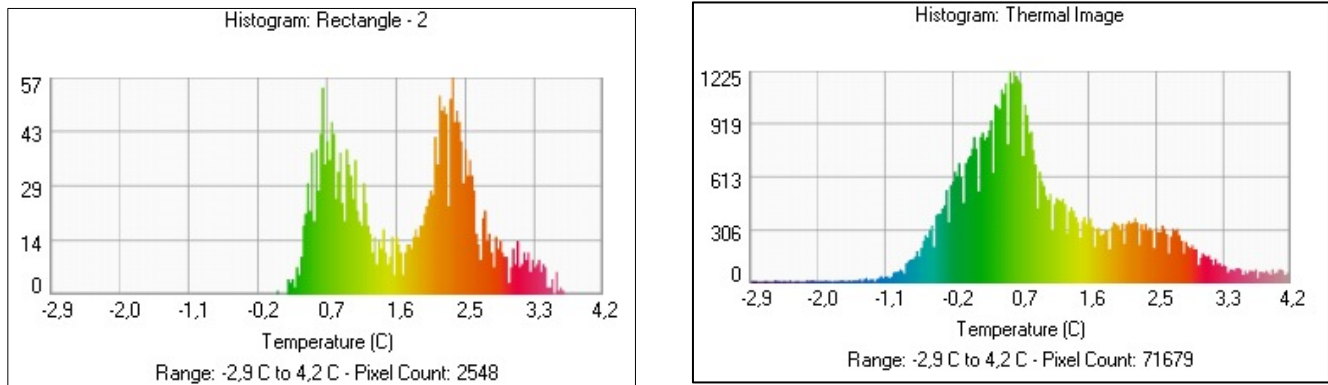


Figura 2.30: Histogrames de distribució del rectangle 2 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

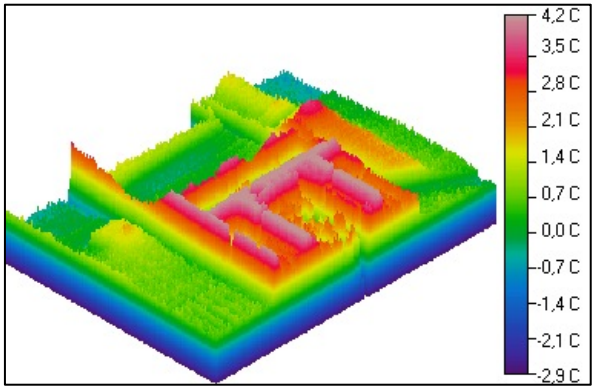
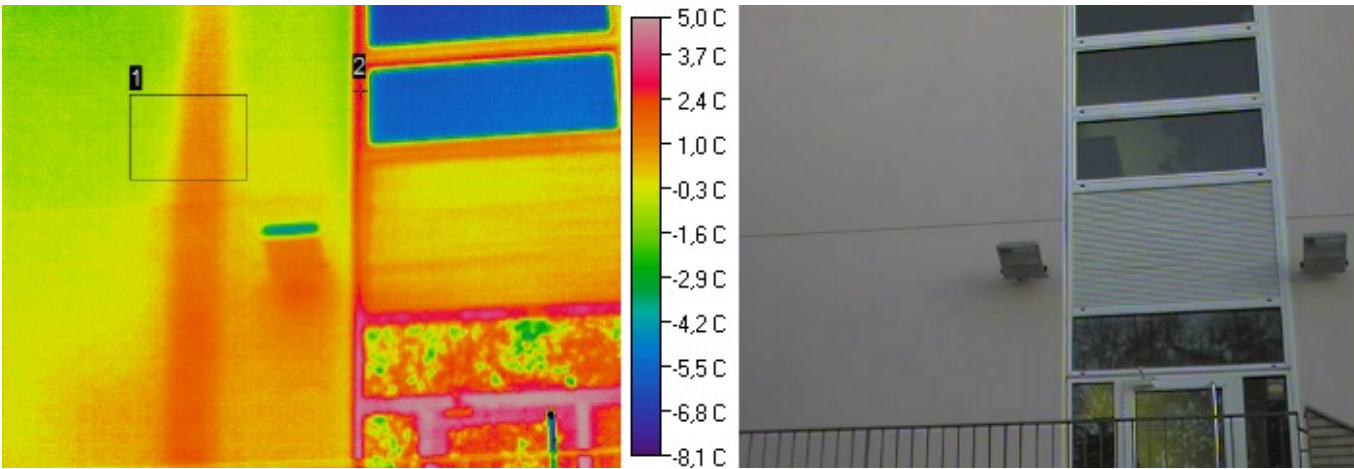
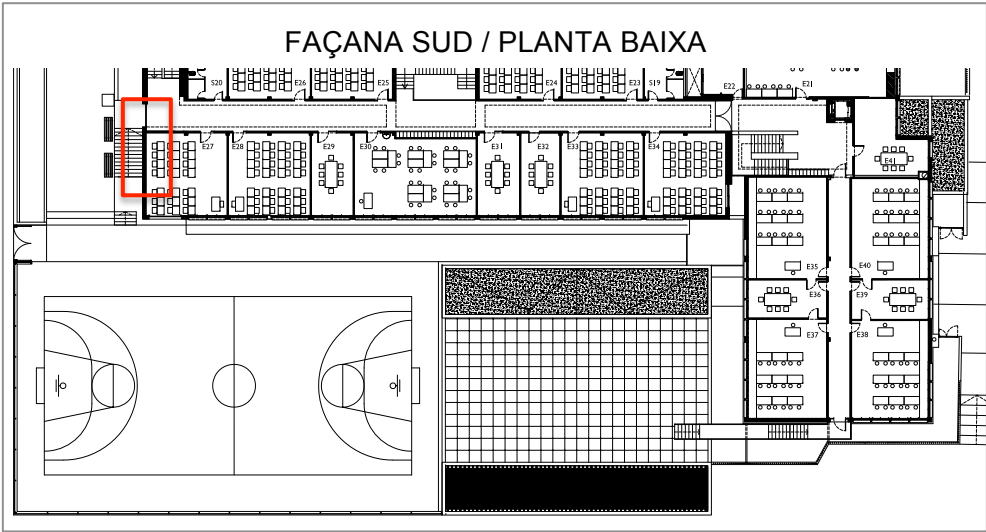


Figura 2.31: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 9:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-1,7 °C	1,1 °C	-0,4 °C	0,93	7 °C	8 m	0,25m ² /14,01
2	-	1,7 °C	-	0,77	7 °C	8 m	-

Aquesta imatge correspon a la mateixa façana anterior, però mostrant el recorregut del pilar esquerre per on s'estan produint dissipacions energètiques (àrea 1). El punt 2 ens mostra novament les pèrdues energètiques que es produeixen per la fusteria de les finestres, les quals no estan dissenyades contra trencament de pont tèrmic.

A continuació s'exposa un histograma corresponent al rectangle 1 i a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), també es mostra una imatge en 3D del termograma:

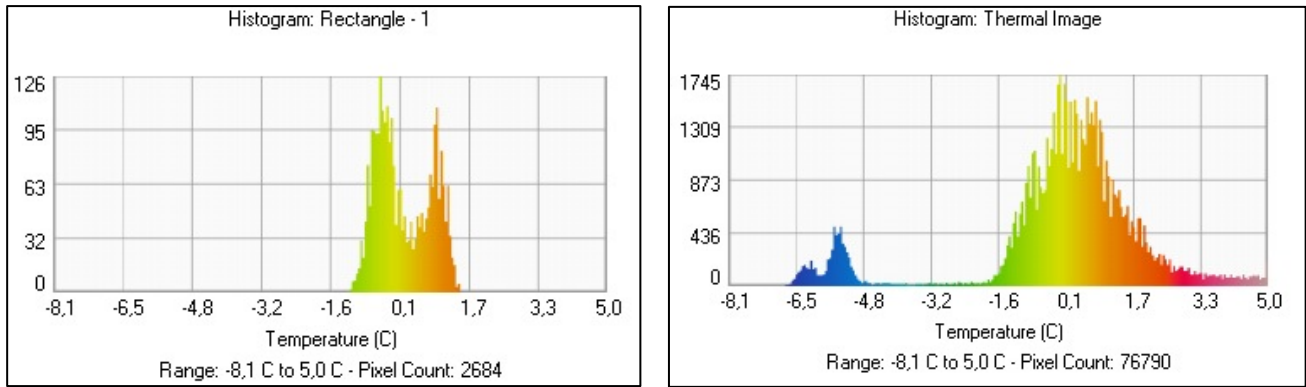


Figura 2.32: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

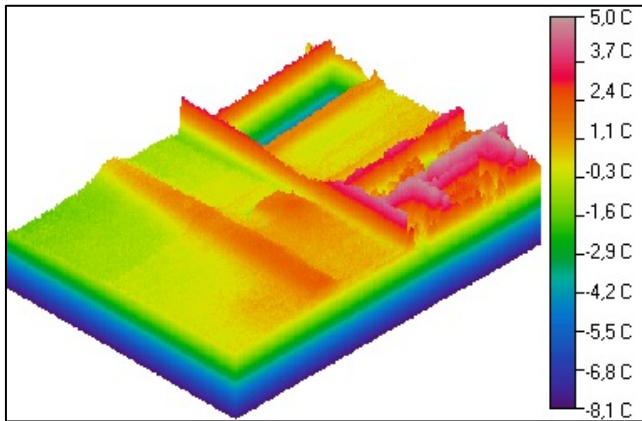
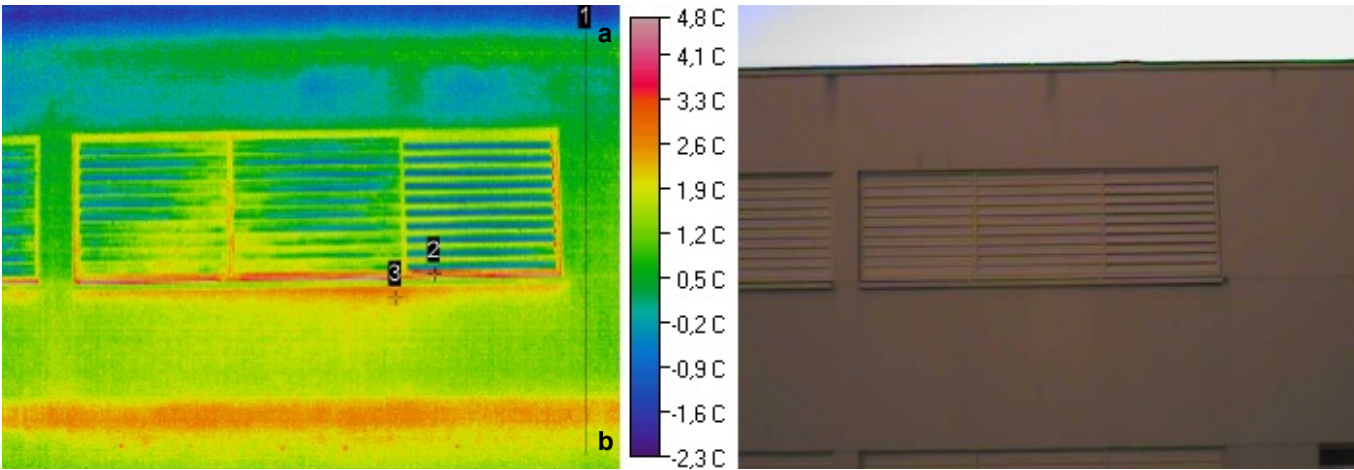
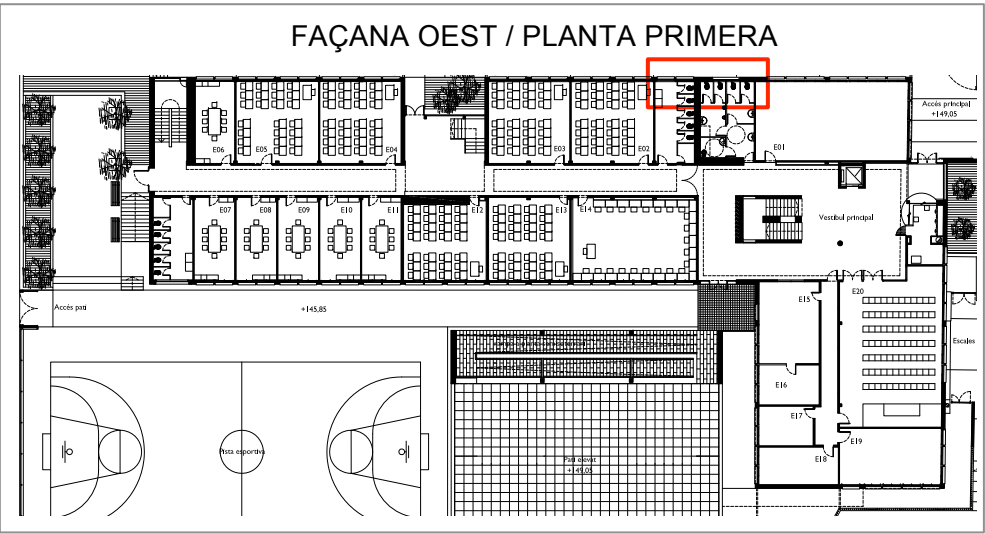


Figura 2.33: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 10:

- Ubicació:



Línia/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	-2,2 °C	2,2 °C	0,3 °C	0,93	9 °C	10 m	2,73 m
2	-	0,8 °C	-	0,77	9 °C	10 m	-
3	-	1,9 °C	-	0,93	9 °C	10 m	-

En aquesta imatge infraroja s'observa clarament el pont tèrmic que existeix en el front del forjat. Amb la línia 1 es vol visualitzar els diferents salts tèrmic que podem trobar en la façana, on la part superior es troba a baixa temperatura, corresponent amb la coronació del mur de coberta i la temperatura va augmentant en funció de la posició dels radiadors els quals es troben en funcionament, fins el cantell del forjat el qual es troba a més temperatura, ja que existeix un pont tèrmic per la manca d'aïllament i

es pot detectar fàcilment ja que les aules superior i inferiors es troben ocupades amb la calefacció en funcionament (incorrecta solució constructiva, veure figura 2.34).

El punt 2 i 3 corresponen a la fusteria de la finestra per on existeixen pèrdues energètiques degut a que no estan dissenyades amb trencament de pont tèrmic.

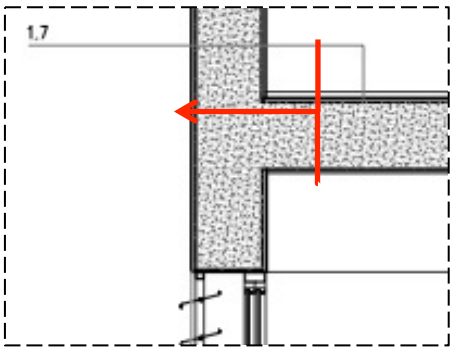


Figura 2.34: Detall constructiu trobada forjat amb tancament de façana. (Font: Projecte executiu d'adequació de l'IES Narcís Monturiol).

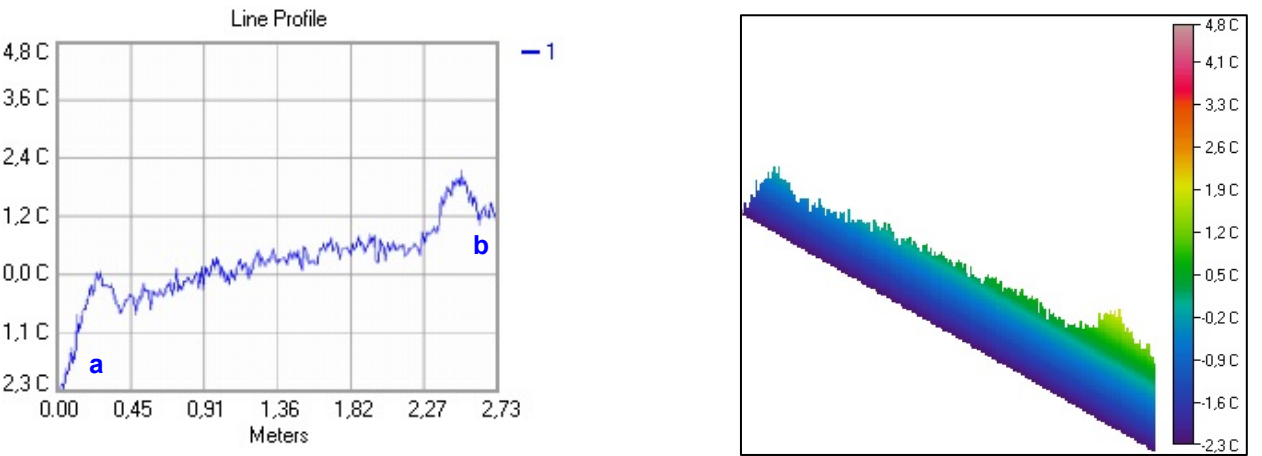


Figura 2.35: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

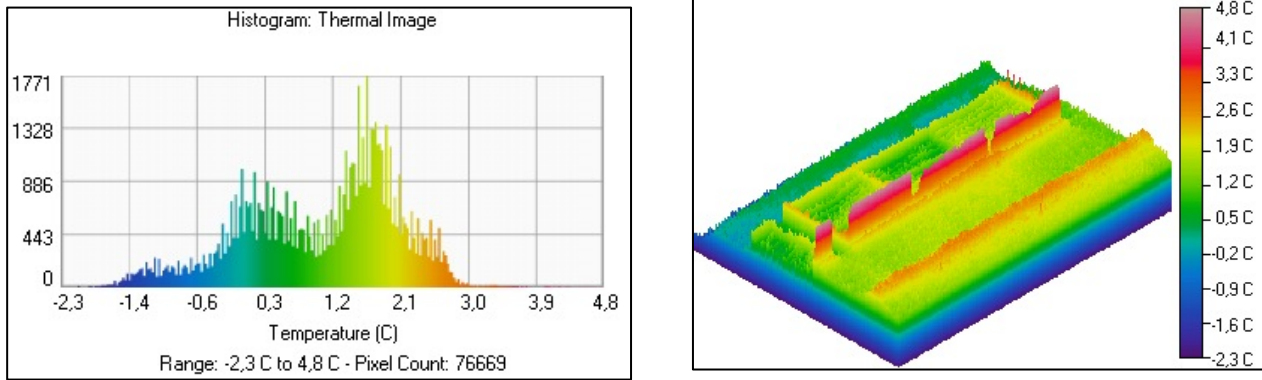
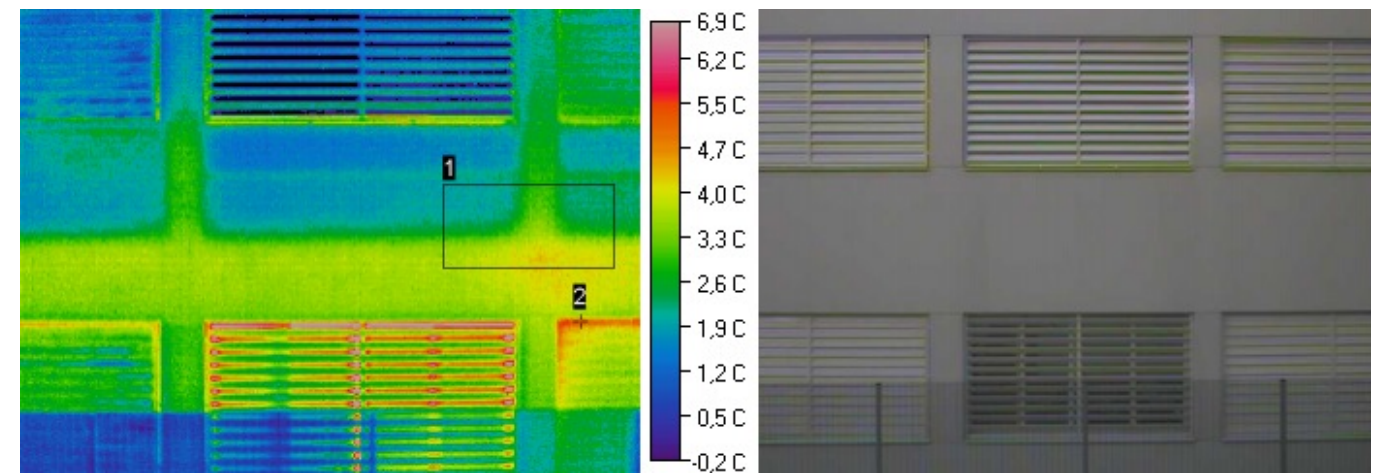
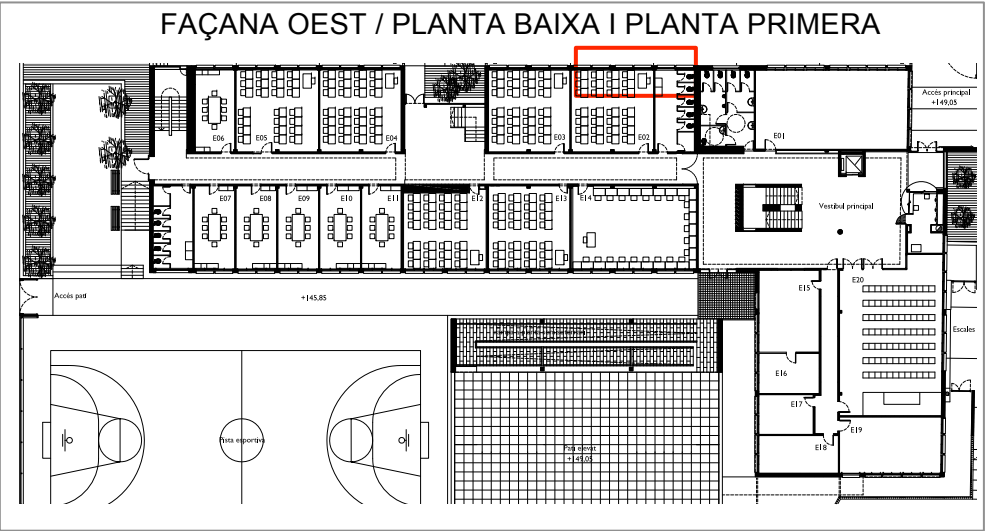


Figura 2.36: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 11:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	1,2 °C	4,3 °C	2,6 °C	0,93	9 °C	10 m	0,55m²/26,67
2	-	4,3 °C	-	0,77	9 °C	10 m	-

En aquest termograma es pot visualitzar que en aquesta façana també es va realitzar una reducció de les dimensions de les finestres per la part inferior (veure figura 2.38). Degut al canvi de solució constructiva la temperatura interior es veu reflectida per la part antiga de la façana composta de murs de formigó els quals no tenen aïllament tèrmic ni càmera. La situació de l'àrea 1 vol analitzar el canvi de temperatura entre les dues solucions que trobem en la façana.

En referència al punt 2, es tracta de la fusteria de les finestres per on es produeixen dissipacions energètiques ja que aquestes no estan dissenyades contra trencament de pont tèrmic.

A continuació s'exposa un histograma corresponent al rectangle 1 i a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), també es mostra un detall de la secció de la façana i una imatge en 3D del termograma

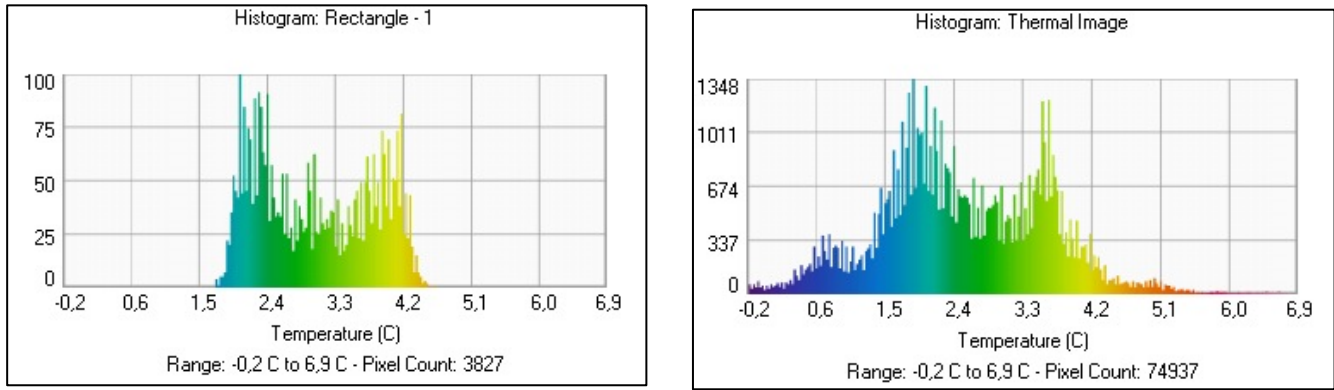


Figura 2.37: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

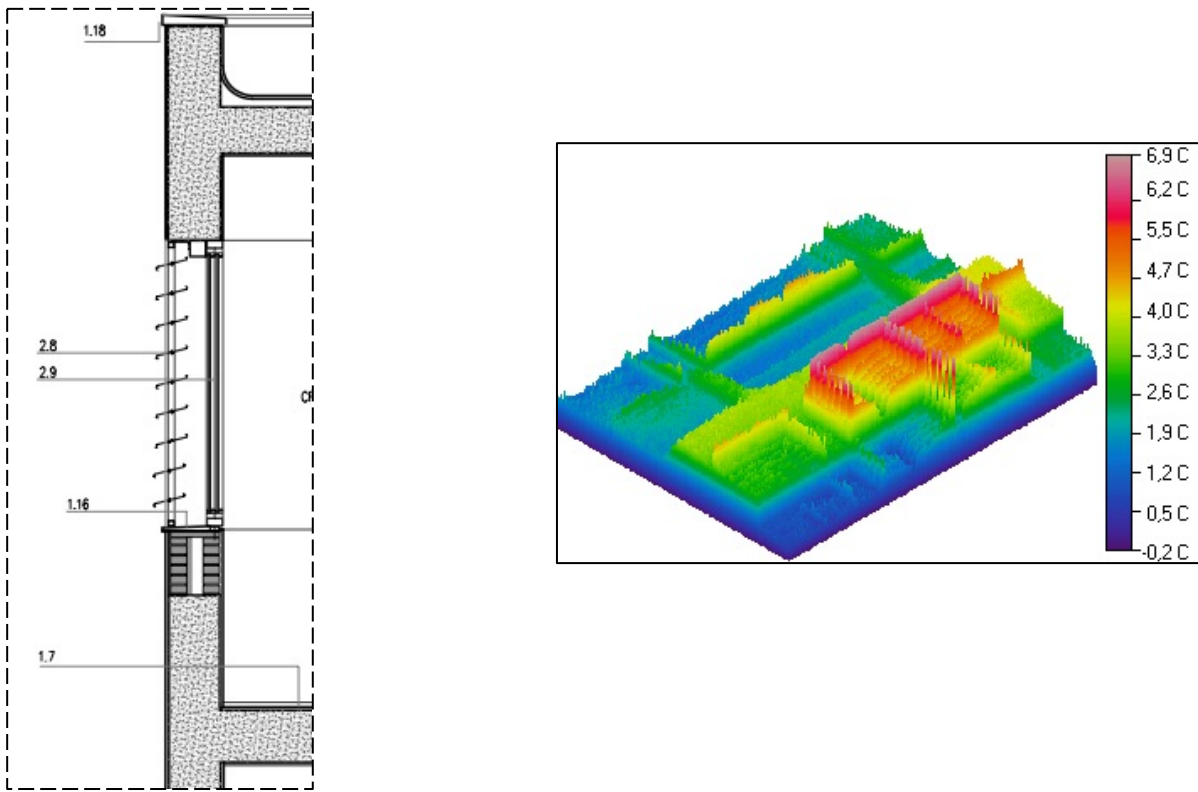
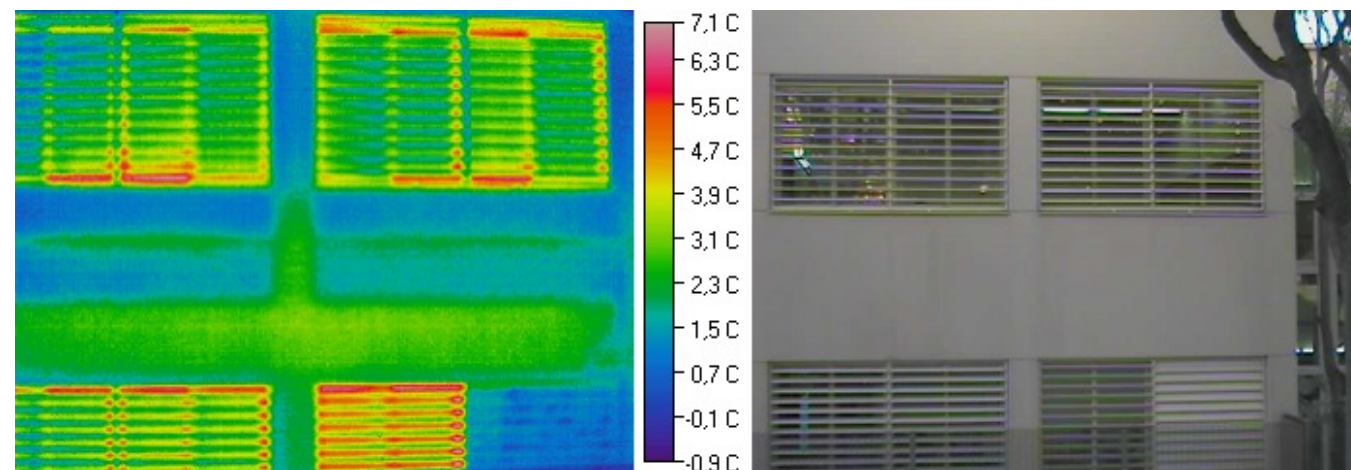


Figura 2.38: Secció constructiva parament de façana i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Projecte executiu d'adequació de l'IES Narcís Monturiol i representació en 3D elaborada pròpiament amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 12:

- Ubicació:

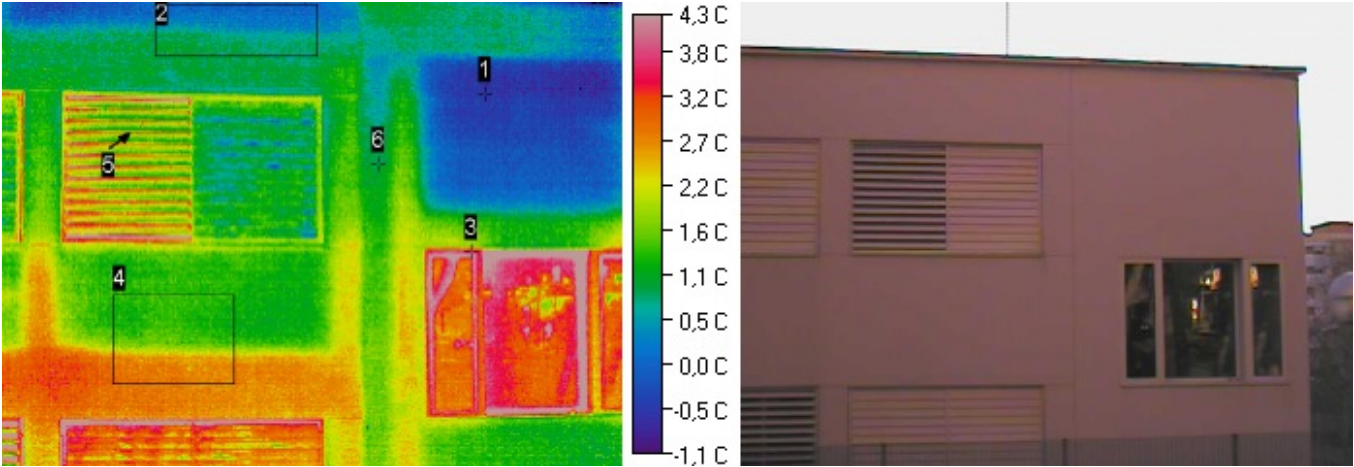


Aquest termograma és una imatge general amb un camp de visió més ampliat de la façana, on es pot detectar clarament l'efecte de la reducció de les finestres degut a la diferència de temperatura entre la part nova i la part conservada.

També observem alguns punts de les fusteries a temperatura més elevada, però en aquest cas els vidres ens generen reflexes importants, que es tindran en compte i s'evitarà treballar amb aquests valors, els quals poden alterar els resultats finals.

TERMOGRAMA 13:

- Ubicació:



Àrea/Punt	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-	-1,3 °C	-	0,93	9 °C	10 m	-
2	-1,1 °C	0,7 °C	-0,1 °C	0,93	9 °C	10 m	0,33m²/24,21
3	-	2,2 °C	-	0,77	9 °C	10 m	-
4	0,1 °C	2,9 °C	1,4 °C	0,93	9 °C	10 m	0,42m²/24,27
6	-	0,3 °C	-	0,93	9 °C	10 m	-

Aquesta termograma corresponent a la façana Oest, ens facilita molta informació que a simple vista no podem veure i que contribueix en el comportament energètic de l'edifici.

El punt 1 ens indica una zona que es troba a temperatura molt baixa. Es tracta d'una part del tancament el qual es va construir en la reforma realitzada a l'any 2004, amb una paret de doble fulla amb càmera d'aire. Aquesta diferent solució que trenca amb la continuïtat de la façana es deixa entreveure amb la càmera infraroja, gràcies a les diferents temperatures.

En referència al punt 2, ens indica la part superior de la façana corresponent al mur de coronació de l'edifici, on existeix humitat retinguda.

El punt 3 ens assenyala les pèrdues energètiques que es produeixen per la fusteria de la finestra. En aquesta finestra es pot observar clarament els reflexes que es poden originar en els vidres i generen mesures errònies.

En relació amb l'àrea 4, aquesta ens mostra la reducció de les dimensions de les finestres, englobant part d'aquesta nova façana amb la façana conservada per poder analitzar les diferents temperatures que varien en 3 °C aproximadament.

La fletxa 5 ens indica l'efecte que crea les lamel·les de protecció obertes o tancades.

El punt 6 ens assenyala la situació d'un elements constructiu ocult, en aquest cas un pilar, en tot el seu recorregut de façana.

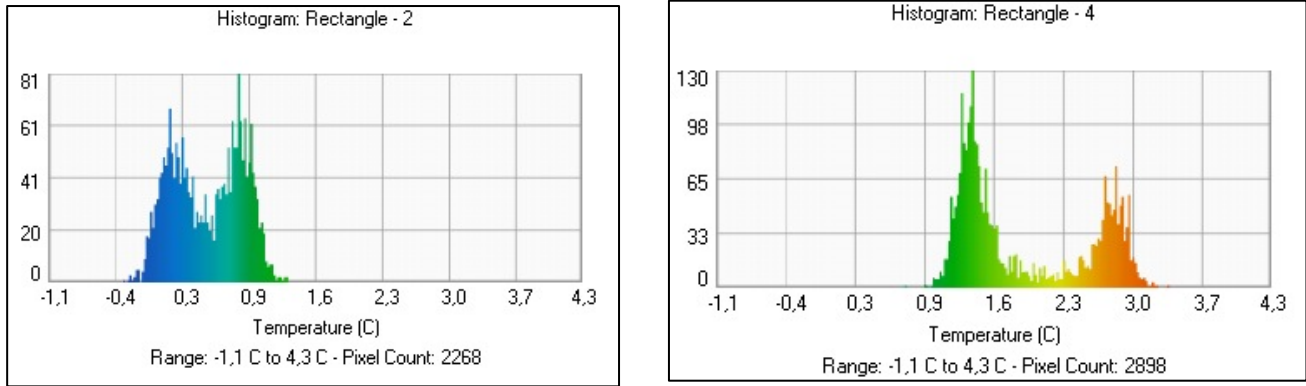


Figura 2.39: Histogrames de distribució del rectangle 2 i 4 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

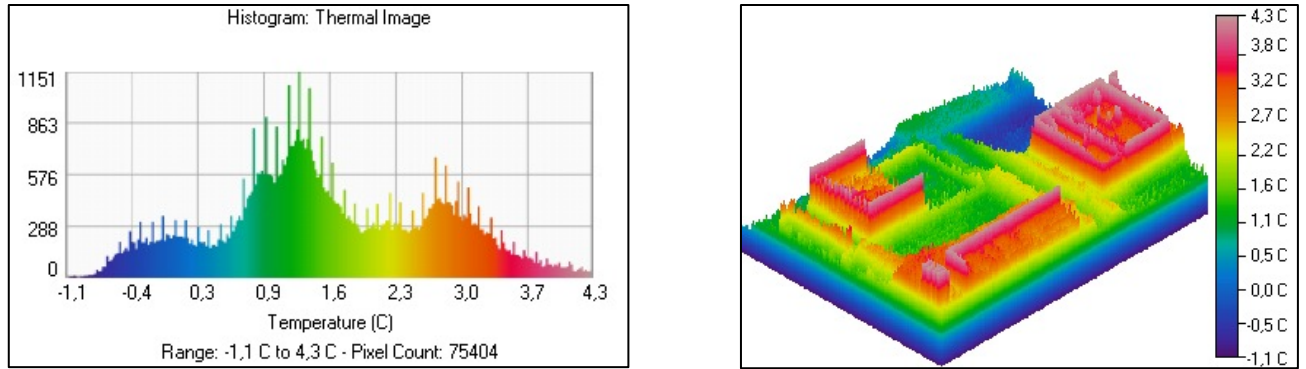
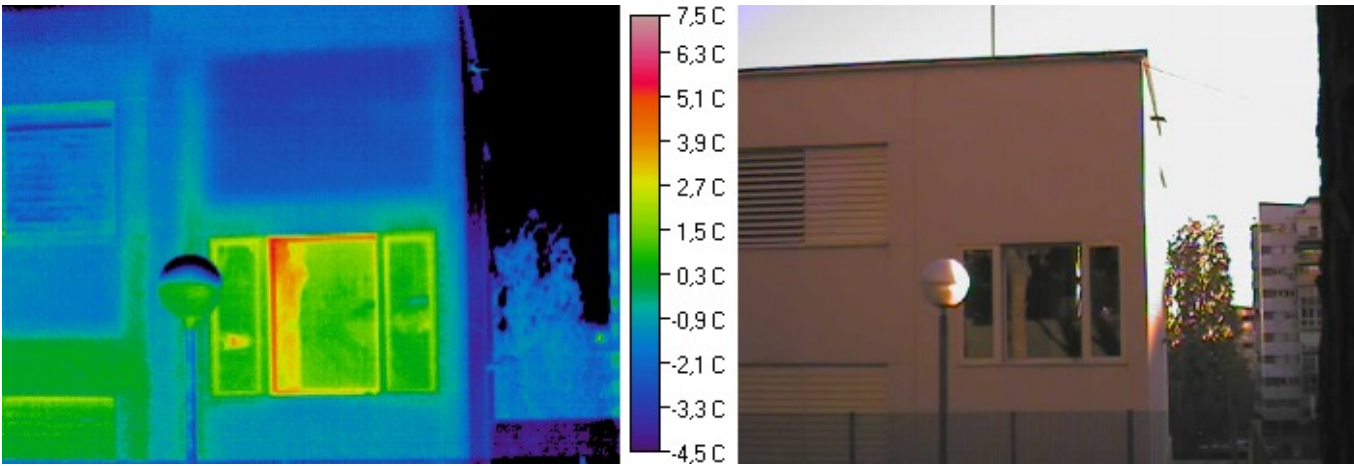
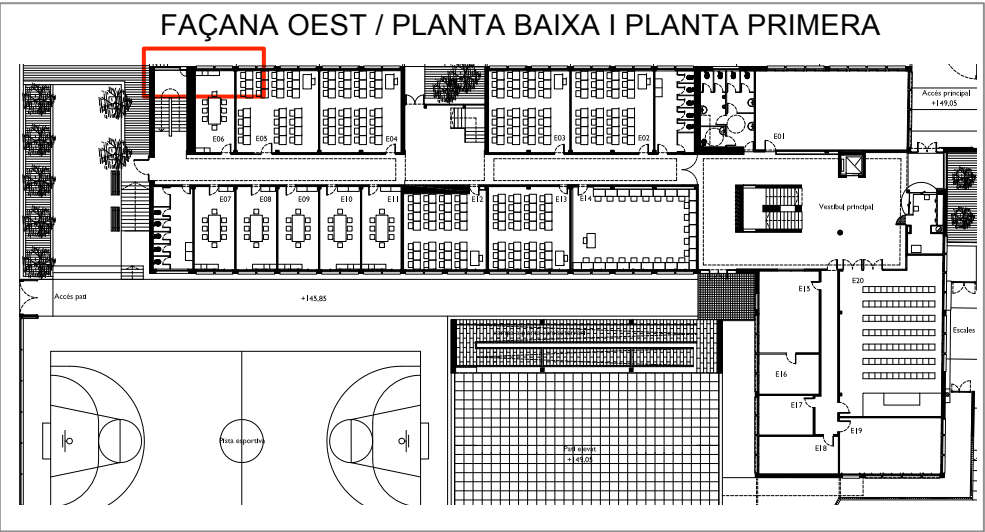


Figura 2.40: Histograma de distribució de Temperatura i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 14:

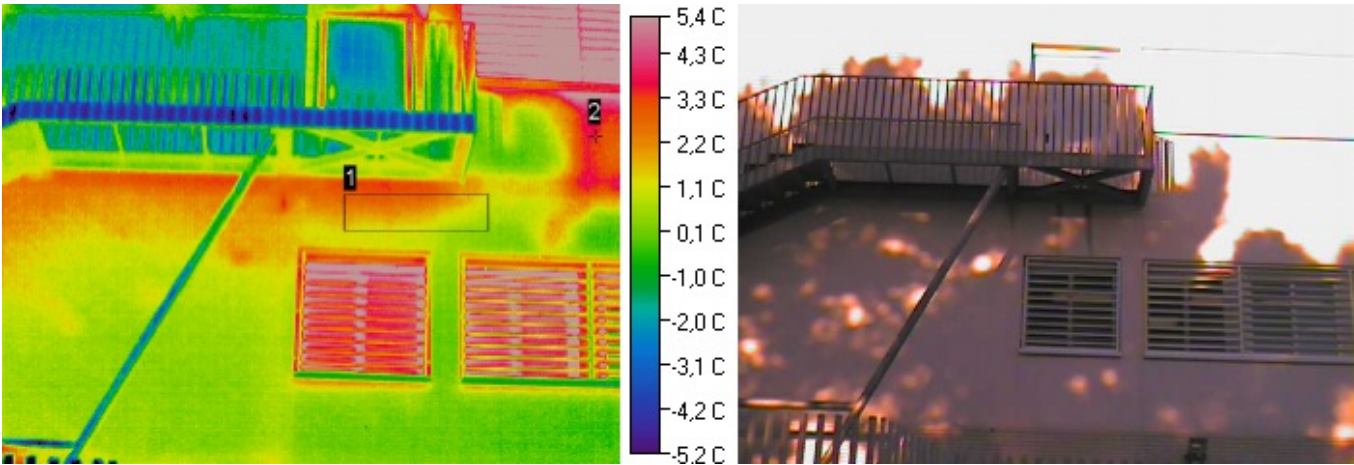
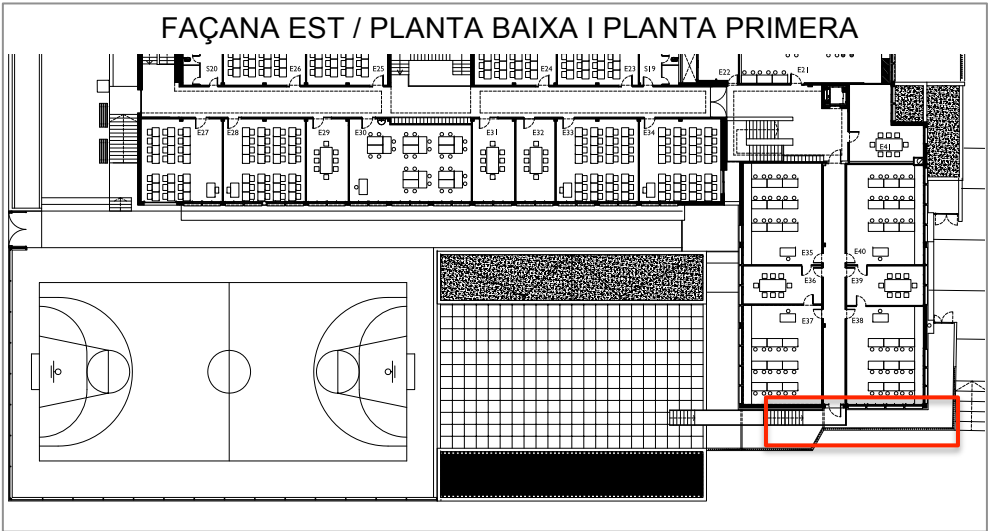
- Ubicació:



Aquesta imatge és una plànol més detallat d'aquest parament afegit durant la reforma. Es tracta d'un entrant que es va voler tancar, i es va realitzar amb una diferent solució constructiva composta de doble fulla i càmera d'aire. En aquesta imatge també es pot observar el recorregut del pilar i la zona afegida en la part inferior de les finestres. En referència amb la finestra inferior, es pot observar que la fusteria es troba a temperatura més elevada ja que no està dissenyada contra trencament de pont tèrmic i s'estan produint pèrdues energètiques de l'interior a l'exterior. La temperatura del vidre no es pot valorar ja que existeixen reflexes de l'arbrat frontal que comporten mesures confoses.

TERMOGRAMA 15:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mìn	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-0,3 °C	2,8 °C	1,3 °C	0,93	9 °C	8 m	0,13m²/8,61
2	-	3,1 °C	-	0,93	9 °C	8 m	-

En l'àrea 1 podem observar una zona que es troba a temperatura més elevada, que correspon a la part inferior de l'escala. En la imatge digital es pot visualitzar que aquesta àrea està ombrejada per l'arbre frontal però que contràriament es troba a més temperatura. Per poder analitzar aquest salt tèrmic, hem comparat aquest termograma amb el termograma 10 del primer anàlisi realitzat al mes de Maig, on aquesta zona es trobava a menys temperatura que la resta de la façana. Aquesta diferència de temperatura és deguda a que existeix un cel ras amb el pas d'instal·lacions de l'electricitat de l'enllumenat, el qual està en funcionament i provoca un augment de temperatura de la zona en qüestió. A diferència de la presa del termograma del primer anàlisi, on aquesta zona no tenia l'enllumenat en funcionament, i conseqüentment no existia un augment de calor en el cel ras.

En referència al punt 2 observem aquesta pujada de temperatura en aquesta zona de la façana ja que existeix el reflex solar. En aquesta imatge podem observar clarament l'efecte que realitza el reflex del Sol en la façana, a diferència del valor de temperatura que obtenim de la part ombrejada per l'arbre frontal. Cal tenir present que ens trobem a primera hora del matí, i la temperatura del parament encara no està sobreescalfada, tot i això si l'anàlisi es realitzés a última hora del dia hauríem de tenir en compte que la radiació solar pot provocar sobreescalfament en la façana, obtenint valors irrealment de temperatura.

A continuació s'exposa un histograma corresponent al rectangle 1 i a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), també es mostra una imatge en 3D del termograma:

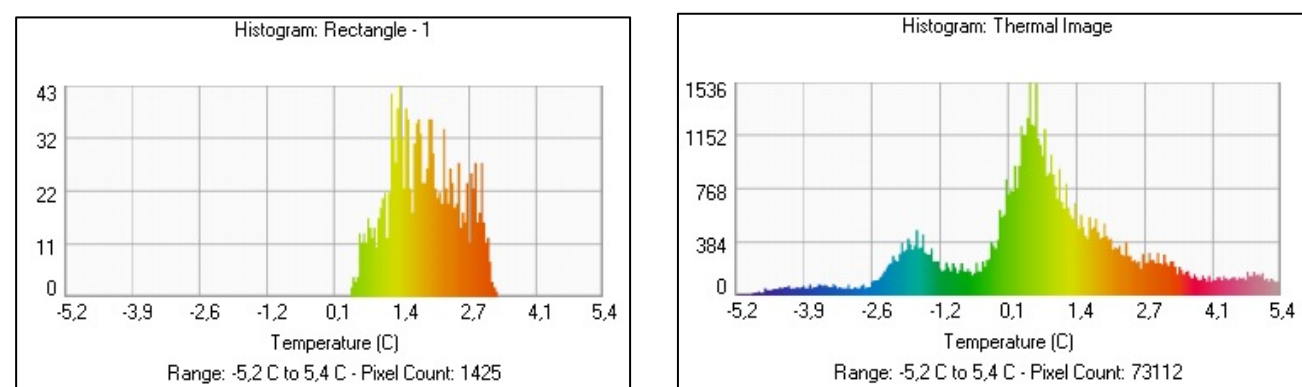


Figura 2.41: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

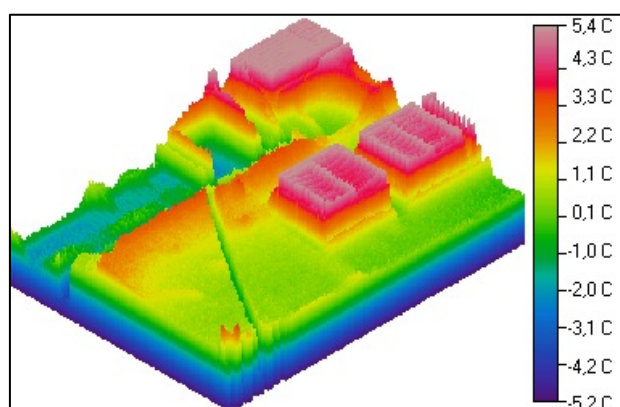


Figura 2.42: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

1.5.5 COMPARACIÓ ENTRE ELS RESULTATS OBTINGUTS EN L'ANÀLISI DE L'EDIFICI REALITZAT AL MES DE MAIG I L'ANÀLISI DEL MES DE DESEMBRE

Un cop efectuat els dos anàlisis termogràfics en les diferents èpoques de l'any corresponents al mateix edifici, s'han pogut obtenir diferents conclusions que s'expliquen a continuació:

En l'anàlisi termogràfic realitzat al mes de Maig, érem conscients de que la temperatura interior i exterior estava molt equilibrada i que probablement no podríem visualitzar diferències de temperatura en la pell de l'edifici. Tot i això, es volia comprovar fins a quin punt la càmera pot detectar deficiències constructives amb un temperatura tan igualada, i posteriorment realitzar un anàlisi termogràfic amb contrast de temperatura entre interior i exterior (al mes de Desembre) per veure les diferències que se'n deriven entre un anàlisi i un altre.

En aquest primer estudi es van poder detectar de forma més dèbil, diferents zones de la façana que tenien temperatura desigual a la resta del parament: regions afegides en les finestres per reduir les dimensions de les mateixes (realitzades en la reforma efectuada a l'any 2004), o pilars que conformen l'estructura de l'edifici i que es deixaven entreveure per la diferència de temperatura.

Tot i això amb el segon estudi realitzat al mes de Desembre on el contrast tèrmic entre interior i exterior era notable (aproximadament de 10 °C), s'ha pogut visualitzar molta més informació que en el primer anàlisi no es va poder detectar degut a la carència de contrast tèrmic. S'han pogut observar de manera més fàcil les deficiències constructives, i els canvis de solucions constructives de les façanes antigues i de les realitzades en la reforma del 2004. A més, s'han pogut visualitzar les pèrdues energètiques que es produeixen per les fusteries de manera més ràpida, ja que el salt tèrmic era més evident. S'han detectat zones del parament on es produïen pèrdues energètiques de zones que en el primer anàlisi van passar desapercebudes, i s'ha comprovat el motiu d'aquests canvis de temperatura. En aquest segon estudi també s'han pogut visualitzar irregularitats de temperatura en la façana que conforma la part del poliesportiu de l'edifici, les quals en el primer anàlisi no es van detectar.

Un cop efectuat aquest estudi doble, és evident que per realitzar un correcte anàlisi termogràfic és necessari contrast tèrmic entre interior i exterior per tal de poder visualitzar detalladament totes les anomalies que són presents en la pell dels edificis.

En aquest edifici s'ha volgut introduir aquesta part comparativa entre fer un anàlisi a la Primavera o a l'Hivern, per tal de que el lector pugui comprovar tot el que s'ha citat durant la teoria de la Termografia, referent a les millors condicions i època de la presa d'un termograma.

1.5.6 PROPOSTES D'ACTUACIÓ:

Un cop realitzat l'anàlisi termogràfic de l'edifici, es considera convenient proposar diferents mesures d'actuació que ajudin a millorar el comportament tèrmic de l'immoble.

En primer lloc, cal tornar a fer esment de la necessitat d'una correcta conducta de l'usuari, el qual interessa que tingui un comportament 100% eficient, per contribuir en la millora tèrmica de l'edifici. La correcta orientació de les lamel·les de les finestres per garantir un adequat confort interior és comesa de l'usuari.

En segon lloc es proposa treballar amb la pell de l'edifici. Durant la inspecció termogràfica he pogut comprovar que les irregularitats de temperatura es produïen en un 80 % en l'envolupant de l'immoble, i gràcies als raigs infrarojos s'han pogut detectar zones renovades durant la reforma, per on s'han generat humitats. Es proposa col·locar una capa d'aïllament en tota la façana, per reduir les emissions de CO₂ a causa de l'eminent demanda d'energia per calefacció i aire condicionat degut a la presència de ponts tèrmics i regularitzar la temperatura interior de l'edifici, evitant la creació d'humitats. Les mesures d'actuació són en cas de que sigui viable, aïllar tèrmicament per l'exterior de l'edifici, ja que és el sistema amb el qual s'aconsegueixen més prestacions de confort i amb l'únic que és possible eliminar els ponts tèrmics, a partir de planxes de poliestirè extruït, revestides per una capa protectora i un acabat amb morters especials. En cas impossible, s'aïllarà per l'interior de l'edifici amb un trasdosat autoportant compost d'una capa d'aïllament i una capa de guix. Sabem que aquesta solució comporta una reducció de l'espai interior, però és una solució viable i econòmica. La col·locació d'aïllament per la càmera d'aire, no és una solució factible, ja que trobem alguns tancaments exteriors de l'edifici que no tenen càmera d'aire, i perdríem la continuïtat de la solució escollida.

La tercera proposta d'actuació es centra en treballar amb la fusteria de la façana Sud, la qual no té trencament de pont tèrmic i per on es produeixen dissipacions energètiques. Es planteja la col·locació de fusteria metàl·lica amb trencament de pont tèrmic en totes les finestres que es troben en la caixa d'escala de l'edifici.

La quarta mesura d'actuació s'enfoca en millorar el comportament de les reixes de ventilació de la façana Oest, les quals són una via de sortida d'un flux elevat d'aire interior degut a les seves grans dimensions, i que provoquin que part de l'energia interior s'escapi. Es proposa la col·locació de tubs de ventilació natural fins la coberta, per poder reduir les dimensions de les actuals reixes que trobem en aquesta part del tancament.

1.5.7 CONCLUSIONS GENERALS:

La reforma realitzada a l'any 2004 ha ajudat a millorar el comportament tèrmic de l'edifici, gràcies a la col·locació de voladus horitzontals de protecció solar en la façana Sud els quals contribueixen a donar ombra a l'estiu i permeten l'entrada de llum a l'hivern, i la instal·lació de lamel·les orientables en totes les finestres de l'edifici.

Les lamel·les de la façana Nord tenen una funció únicament ornamental, ja que aquesta façana no rep radiació solar. És per aquest motiu que es consideren un element que dona integritat formal a la façana de l'edifici.

En el cas de les lamel·les de la façana Est, aquestes realitzen una funció important. En la següent imatge es mostra la radiació rebuda per una finestra de la façana Est. En el segon cas, es pot veure l'efecte que té sobre la mateixa la presència de lamel·les. La mobilitat d'aquestes permet gestionar d'una manera més eficient la radiació al llarg de tot l'any.

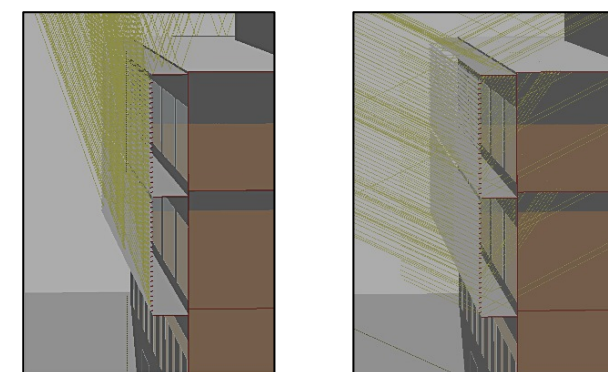


Figura 2.43: Simulació de radiació directa en façana Est, en els mesos de Juny i Gener respectivament (Font: GOP)

La col·locació de vidres amb doble càmera ajuden a evitar un pont tèrmic en l'immoble, ja que en la presa dels termogrames, he pogut observar que no suposaven una via de sortida d'energia.

Cal destacar que amb l'anàlisi termogràfic he pogut comprovar que la manca d'aïllament en tota la façana (tant en les parts antigues com en les noves solucions constructives de les parts reformades) és un gran causant de les pèrdues energètiques de l'edifici o de les irregularitats de temperatura, així com els ponts tèrmics particulars dels fronts de forjats, que provoquen un augment considerable de la demanda energètica de l'edifici.

Aquest estudi també ens ha ajudat a descobrir elements ocults que a simple vista no es poden detectar però que participen en l'estat tèrmic de l'edifici, i conseqüentment afecta al confort dels usuaris.

(Inspecció i informe termogràfic de façanes segons les directrius de la Norma Europea EN 13187:1999)

1.6 ANÀLISI TERMOGRÀFIC UNITAT DE LA MANÇANA DE L'EIXAMPLE

En els anàlisis termogràfics anteriors, ens hem enfocat en treballar sobre edificis d'ús docent, dels quals s'han realitzat auditories energètiques. En aquest apartat, ens centrem en analitzar termogràficament els edificis d'una mançana de l'Eixample de Barcelona, de la qual es va realitzar una rehabilitació energètica, com a Projecte Final de Grau.

Es pretén per tant, avaluar l'estat actual dels tancaments de façana dels edificis d'aquesta mançana, els quals es caracteritzen per ser d'ús comercial, residencial i d'oficines, (a diferència dels edificis anteriors) i d'altres èpoques, fent recerca de possibles zones afectades, degut a una deficient solució constructiva, o a la manca d'aïllament, i aportant informació necessària i innovadora, al projecte final de Grau de la Rehabilitació energètica de la Unitat de la mançana de l'Eixample realitzat per altres companyes.

1.6.1 INTRODUCCIÓ

El conjunt d'edificis a analitzar correspon a la mançana de l'Eixample delimitada pel Carrer Mallorca, Carrer de Pau Claris, Carrer València i Passeig de Gràcia, a la dreta de l'Eixample.

Els sistemes de construcció de l'Eixample es basen en una estructura molt simple que consisteix en l'ús de morter i ceràmica, i l'ús de la fàbrica de maó, un sistema tradicional que es va repetir durant molts períodes fins a l'arribada de noves solucions. Si ens situem en el lloc de la inspecció, podem diferenciar visualment l'estructura entre les construccions del 1890-1936 i les posteriors. El primer període correspon a l'època del pre-modernisme, el modernisme i el postmodernisme, i el segon període fa referència a l'Arquitectura Contemporània i les Noves solucions.

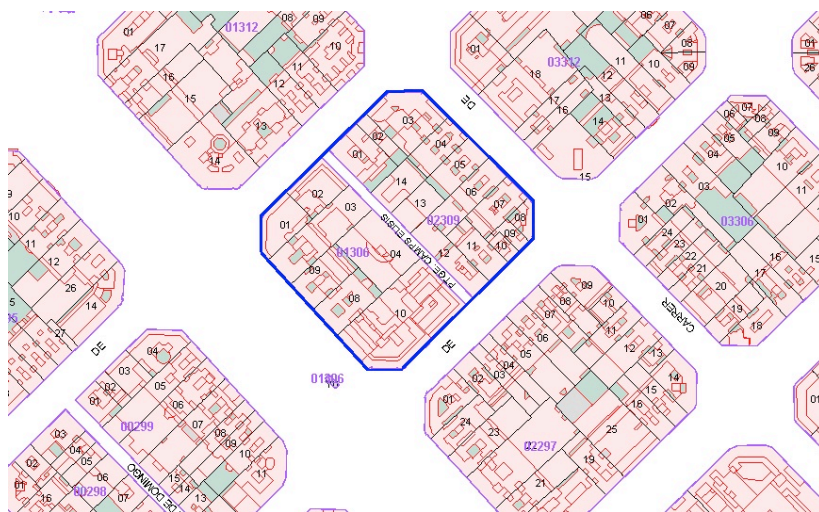


Figura 2.44: Plànol de situació de la mançana de l'Eixample (Font: Sede Catastro)

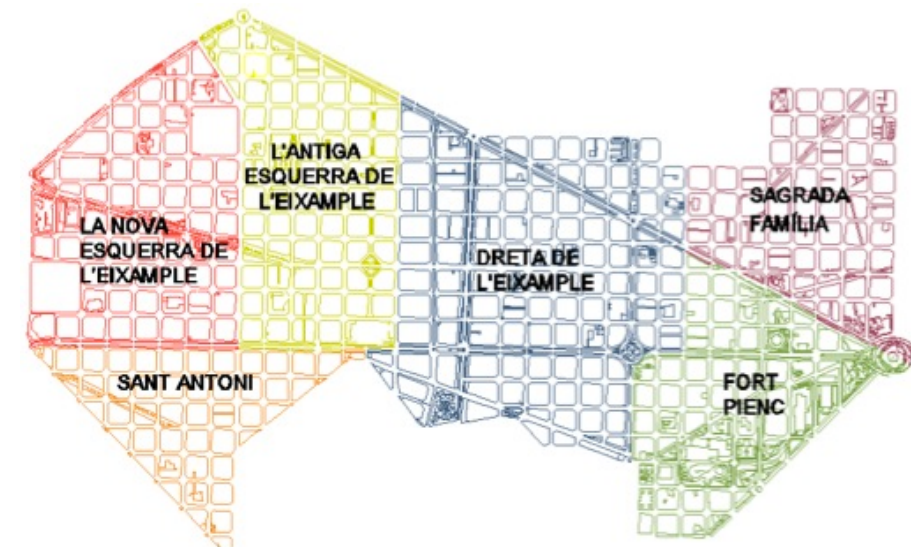


Figura 2.45: Plànol Districte de l'Eixample (Font: PFG "Unitat de la mançana de l'Eixample")

1.6.2 DESCRIPCIÓ CONSTRUCTIVA DELS EDIFICIS

La construcció d'aquesta illa va ser evolutiva, els edificis es van anar construint en diferents èpoques, i si observem els diferents immobles, podem comprovar que existeix una diferència notable entre els edificis construïts amb un sistema tradicional i els edificis d'arquitectura moderna.

Tot i això, l'estil predominant en l'illa en un 86 %, és l'estil tradicional Modernista (comprès entre els anys 1860-1936), caracteritzat pel caràcter ornamental i decoratiu.

El sistema constructiu de les façanes de construcció tradicional (la qual es caracteritza per ser prèvia a l'entrada en vigor de les norma tèrmica: Norma Bàsica de la edificación "NBE-CT-79" sobre Condiciones Térmicas de los Edificios, REAL DECRETO 2429/1979, de 6-JUL, de la Presidencia del Gobierno B.O.E.: 22-OCT-79) es caracteritza per estar compost d'una capa de 30 cm de gruix de fàbrica de maó massís de 29x14x5 cm, llosanes dels balcons de pedra, llindes de pedra natural i fusteries amb marcs de fusta i vidres monolítics. L'aspecte final dels edificis varia segons el revestiment emprat. Trobem edificis amb aplacat de pedra natural, amb estucats, esgrafiats, arrebossats o pintats. Cal destacar però, que el 61% dels revestiments que podem trobar a l'illa, fan referència a l'acabat estucat.

El sistema constructiu de les façanes d'arquitectura moderna, on s'han aplicat les noves solucions (14 % restant), es caracteritzen per estar compostes d'un aplacat amb peces ceràmiques, una capa de morter, una capa de fàbrica de maó de 14 cm de gruix, una càmera d'aire de 5 cm de gruix, una capa de maó buit de 6 cm de gruix i un enguixat com acabat final interior.

1.6.3 DOCUMENTACIÓ GRÀFICA DE L'EDIFICI

1.6.3.1 FOTOGRAFIES DE L'EDIFICI:



Figura 2.46: Imatges de les façanes dels edificis de la mançana de l'Eixample (Font: Elaboració pròpia)

1.6.3.2 PLÀNOL EIXAMPLE:

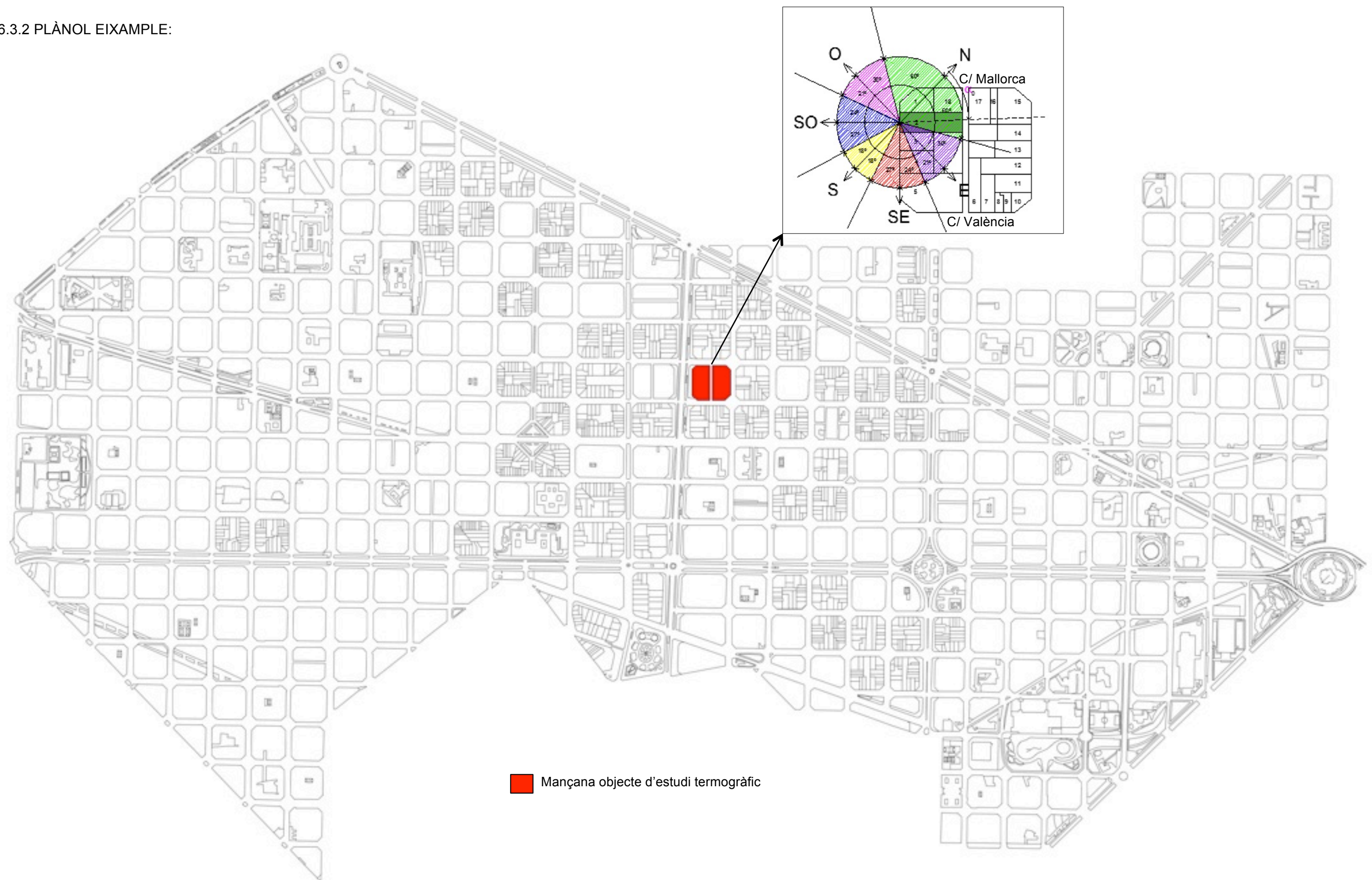


Figura 2.47: Plànol parcel·lació mançanes de l'Eixample (Font: PFG "Unitat de la Mançana de l'Eixample i Elaboració pròpia).

1.6.4 RECOLLIDA DE DADES, TRACTAMENT DE TERMOGRAMES I ANÀLISI DE RESULTATS

L'anàlisi Termogràfic d'aquest conjunt edificatori s'ha realitzat al mes de Juliol (coincidint amb el període corresponent als mesos de matrícula del Projecte), amb l'inconvenient de tenir una temperatura exterior i interior molt equilibrada, i per tant, amb la dificultat afegida de poder trobar ponts tèrmics en la pell de l'edifici. Tot i això hem pogut detectar que molts edificis tenien l'aire condicionat en funcionament en l'interior de les estàncies, fet que ha facilitat la detecció d'irregularitats en els tancaments dels edificis gràcies a les diferències de temperatura. També ens hem trobat en el cas que la temperatura interior era més elevada que l'exterior, i s'han pogut analitzar algunes deficiències constructives. Tot i això, es recomana realitzar l'anàlisi Termogràfic quan la temperatura exterior és inferior i l'interior superior (amb els sistemes de calefacció en funcionament), ja que es detecten de manera més fiable les pèrdues energètiques de l'edifici. En aquest cas, i degut a la limitació de temps per realitzar el Projecte, s'ha hagut d'adaptar l'anàlisi als mesos de matrícula del Projecte.

Aquesta part del Projecte dóna continuació al Projecte Final de Grau de “La Unitat de la Mançana de l'Eixample” on s'ha complementat l'avaluació amb l'ús d'una càmera termogràfica, la qual ens ha aportat dades numèriques, i imatges reals de la situació de l'edifici. Fet que ajuda a entendre amb facilitat l'estat de l'edifici, i és una mesura que pot ajudar a fer comprendre als usuaris la necessitat de realitzar canvis.

Les dades de la inspecció termogràfica s'han recollit amb una fitxa de recollida de dades, que s'exposa a continuació:

Localitat	Adreça	Nº	Vent: Direcció i velocitat	Orientació	Dia/mes/any	Hora Inici anàlisi	Estat del cel	Temp. Exterior	H % Exterior	Hora Fi anàlisi
Barcelona	C/ València, C/ Pau Claris, C/ Mallorca i Passeig de Gràcia	74 al 270	12 km/h SO	Altitud 40 m	17 / 07 / 2012	18,35 h	No ennuvolat, assolellat	30,3 °C	41,10%	20 h

Nº Presa	Ubicació	Distància presa del termograma	Tº Exterior	Tº exterior 24 hores abans	Tº Interior	Tº Superficial	H % Exterior	H% interior	Observacions
TH91083 TH91084	C/ València Nº 263	20 m	30,3 °C	29,8 °C	28-29 °C	28,1 °C	41,7 %	44,2 %	Les mesures obtingudes de l'interior de l'edifici, s'han pres del vestíbul de l'edifici.
TH910081 TH910082	C/ València Nº 261	20 m	30 °C	29,8 °C	-	28,5 °C	42 %	-	Presència d'arbres que provoquen ombra a l'edifici.
TH91085 TH91086 TH91087 TH91088	C/ València Nº 267	20 m	30,2 °C	29,8 °C	-	30,3 °C	45,1 %	-	Punt de rosada Dp= 16,6 °C Esfera humida Wb = 20,9 °C
TH91090 TH91091	C/ Pau Claris Nº 151	20 m	30,1 °C	29,8 °C	-	-	40,6 %	-	Punt de rosada Dp= 14 °C Esfera humida Wb = 19,7 °C
TH91092	C/ Pau Claris Nº 155	20 m	29,4 °C	29,8 °C	-	-	43,5 %	-	Presència d'arbres que provoquen ombra als edificis.
TH91093	C/ Mallorca Nº 268	20 m	29,4 °C	29,8 °C	-	28,9 °C	45 %	-	Punt de rosada Dp= 16,6 °C Esfera humida Wb = 20,6 °C
TH91094	C/ Mallorca Nº 260-262	m	29,4 °C	29,8 °C	-	29,7 °C	44,1 %	-	En el moment de l'anàlisi de les façanes dels edificis del Carrer Mallorca, existia radiació solar incidint en part dels tancaments que s'haurà de tenir present.

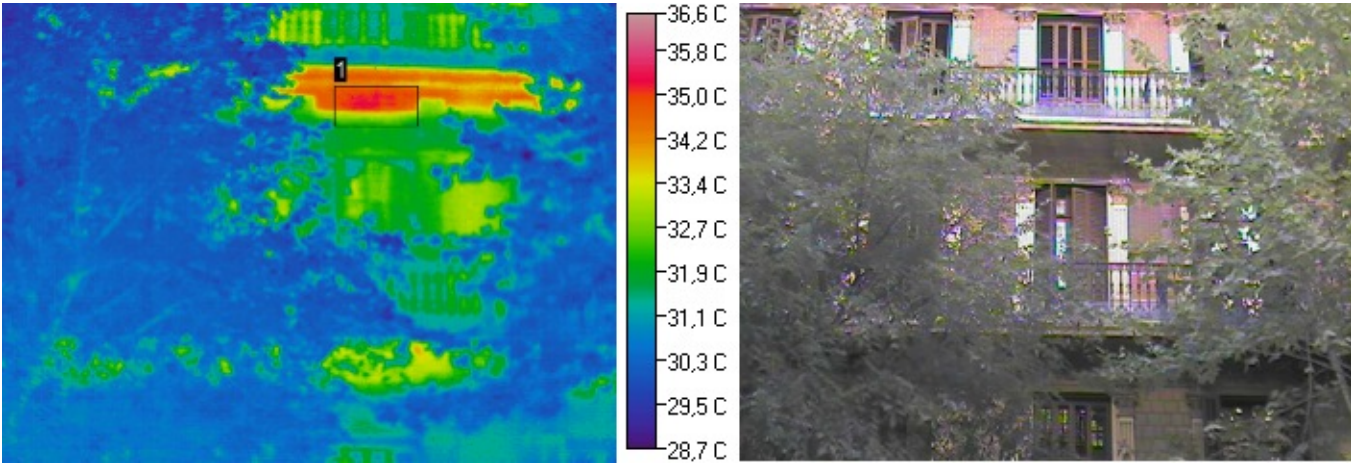
*Nota: Els edificis número 74 i 76 de Passeig de Gràcia no s'han analitzat degut a l'arbrat frontal que dificultava la presa dels termogrames, i provocava mesures confoses. L'edifici corresponent a Passeig de Gràcia número 68/70 i Carrer València número 251, que fa referència a l'Hotel Majestic es trobava en fase de rehabilitació de la façana, i la bastida frontal dificultava la correcta realització d'imatges termogràfiques. Per aquest motiu, en el següent estudi termogràfic aquests tres edificis no estaran presents.

Taula 2.48: Fitxa de recollida de dades (Font: elaboració pròpia i Meteoclimatic)

TERMOGRAMA 1:

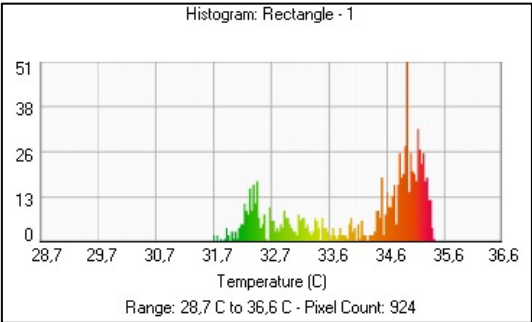
- Ubicació:

FAÇANA SUD - EST / CARRER VALÈNCIA



Àrea	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	31,8 °C	35,8 °C	34,4 °C	0,93	30,3 °C	20 m	0,53m²/19,42

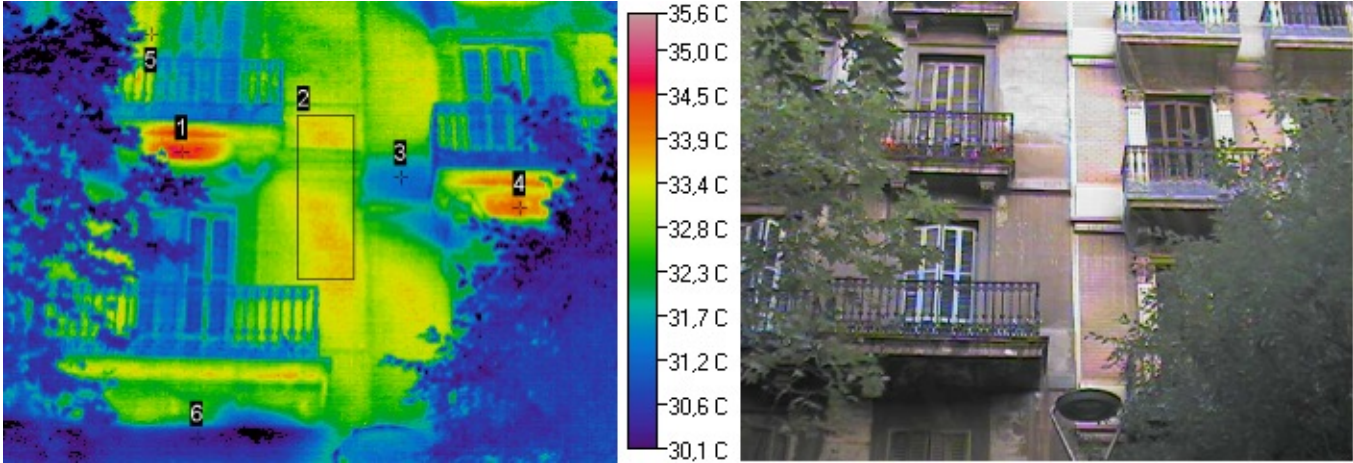
En aquest termograma s'indica una zona (àrea 1) la qual es troba a temperatura superior en comparació amb la resta de la façana. Es tracta d'un punt crític en l'edificació, ja que es troba a més temperatura que la temperatura ambient (29 °C). No podem valorar la causa exacta d'aquest salt tèrmic, ja que no hem pogut accedir a l'interior de l'habitatge, i conseqüentment no hem pogut obtenir les dades de temperatura i humitat interior de l'edifici. Tot i això, amb la càmera termogràfica hem pogut detectar que es tracta d'una part de la façana que genera deficiències en el comportament tèrmic de l'edifici i que cal tenir present. En l'histograma corresponent al rectangle 1 es pot visualitzar el salt tèrmic que existeix en aquesta zona.



TERMOGRAMA 2:

- Ubicació:

FAÇANA SUD - EST / CARRER VALÈNCIA

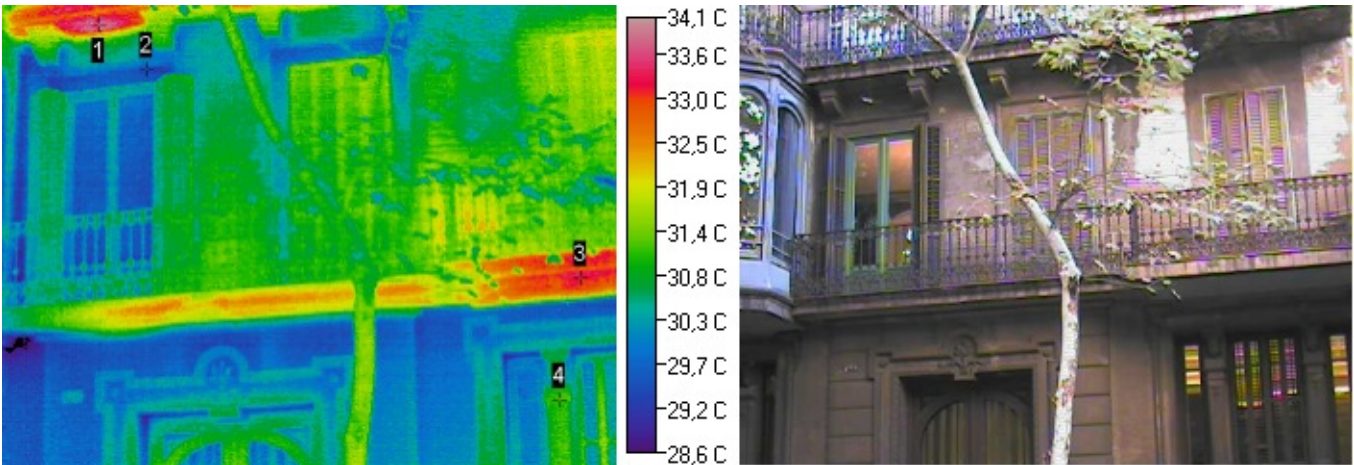
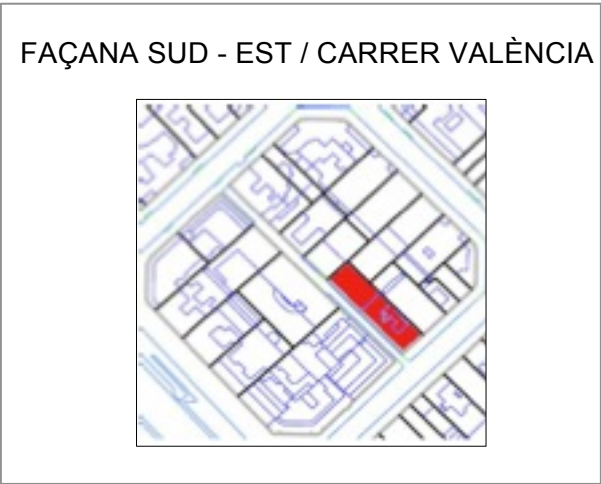


Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-	34,9 °C	-	0,93	30 °C	20 m	-
2	32,7 °C	34,2 °C	33,7 °C	0,93	30 °C	20 m	1,47m²/43,25
3	-	31,6 °C	-	0,93	30 °C	20 m	-
4	-	34,7 °C	-	0,93	30 °C	20 m	-
5	-	34 °C	-	0,93	30 °C	20 m	-
6	-	30,3 °C	-	0,93	30 °C	20 m	-

En aquesta imatge infraroja podem observar els punts 1 i 4, els quals ens indiquen les llosanes dels balcons, les quals es troben a temperatura superior que la temperatura ambient. L'àrea 2, ens marca la irregularitat de temperatura que existeix en la façana. El punt 3 i 6 ens mostren zones de la façana, les quals tenen una temperatura més baixa, tot i que continuen superant la temperatura ambient de 29 °C. En referència a aquests salts tèrmics detectats a partir de la imatge infraroja, no es poden extreure conclusions fiables al 100%, ja que ens manquen dades de temperatures i humitat interior.

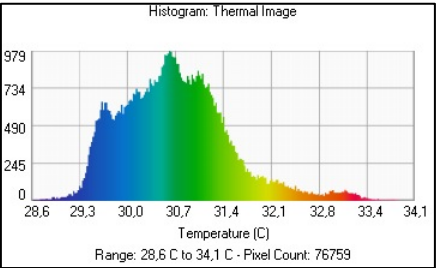
TERMOGRAMA 3:

- Ubicació:



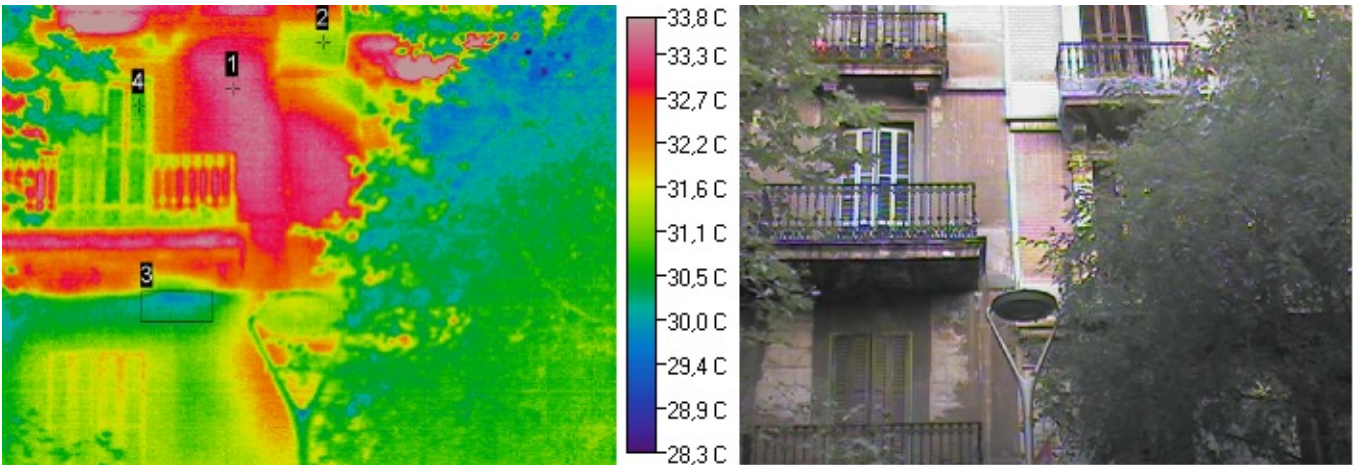
Punt	Temperatura	Emissivitat	Temperatura ambient	Distància
1	34,1 °C	0,93	30 °C	20 m
2	29,3 °C	0,93	30 °C	20 m
3	33,4 °C	0,93	30 °C	20 m
4	31,8 °C	0,67	30 °C	20 m

Aquest edifici està format per PB + 5 PP, amb dos vivendes per planta, fent un total de 10 vivendes, 2 oficines en PB i 2 locals comercials en Planta Soterrani. Si ens fixem en la imatge infraroja podem observar que les lloses dels balcons es troben a més temperatura, en la mateixa línia que els edificis anteriors. Cal remarcar que a l'any 1998, aquests elements es van reparar però no podem extreure valoracions, degut a que necessitem dades de temperatura de l'interior de l'edifici (on no s'ha pogut accedir, ja que es tractaven de vivendes particulars) per poder realitzar un correcte anàlisi termogràfic.



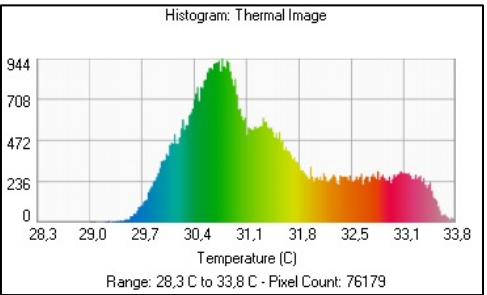
TERMOGRAMA 4:

- Ubicació:

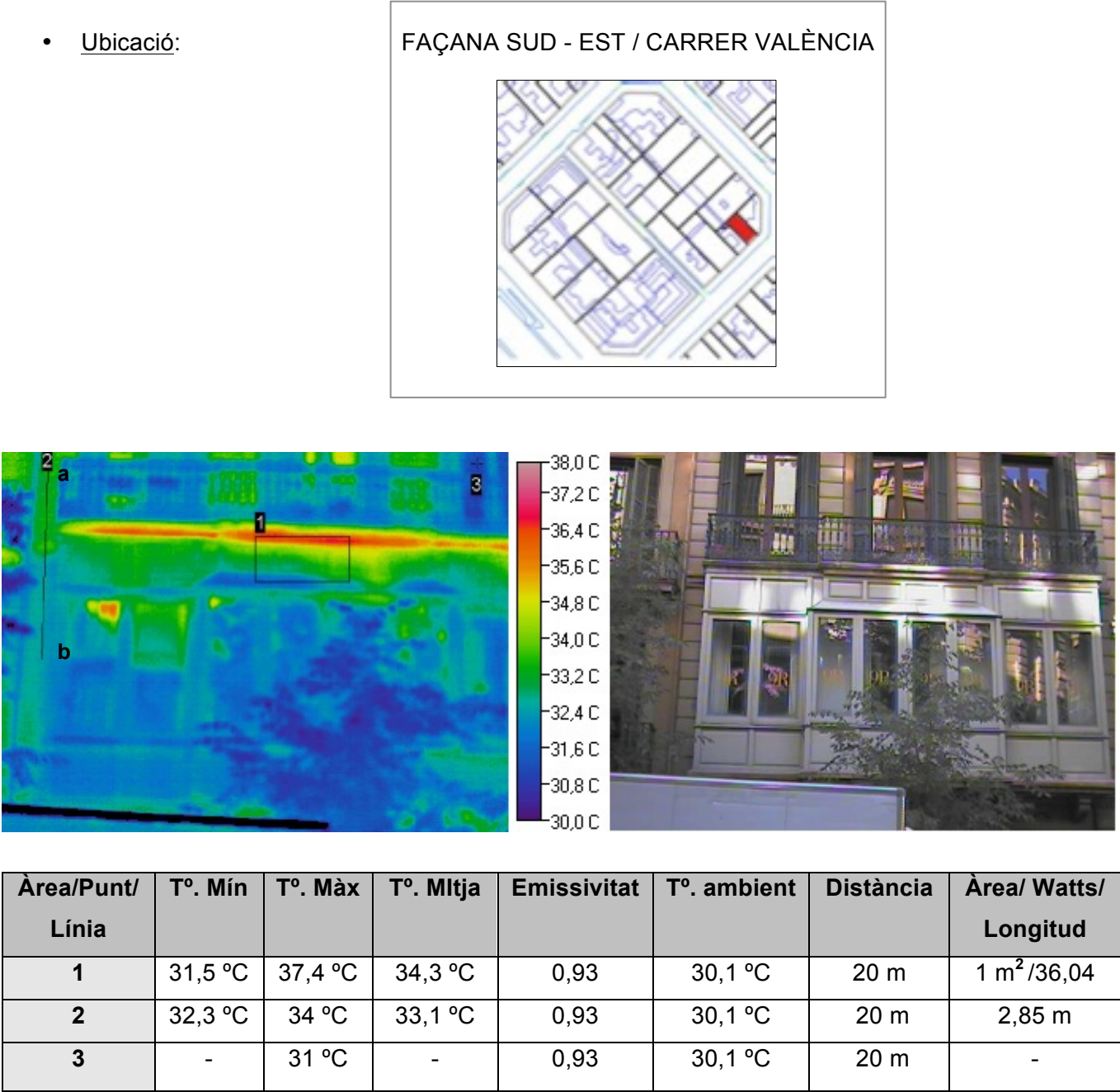


Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	-	33,8 °C	-	0,93	30,2 °C	20 m	-
2	-	31,3 °C	-	0,93	30,2 °C	20 m	-
3	29,6 °C	31,4 °C	30,3 °C	0,93	30,2 °C	20 m	0,35 m² /0,24
4	-	30,9 °C	-	0,94	30,2 °C	20 m	-

En aquest termograma observem la diferència de temperatura que trobem entre la façana de la planta superior, la qual es troba a temperatura elevada, i la planta inferior que es tracta d'una vivenda no habitada, i la temperatura disminueix notablement. També s'observen que els ornaments de pedra artificial i natural, es troben a més baixa temperatura.



TERMOGRAMA 5:



Ens trobem amb un edifici format per PB + 5 PP, amb una vivenda per planta, fent un total de 5 vivendes i un local comercial en PB. A l'any 2001 es va restaurar la façana principal, els patis, l'ampit del terrat, vestíbuls i les instal·lacions de l'ascensor. A l'any 2008, es van restaurar els locals de la planta baixa. Si observem la imatge termogràfica, es pot visualitzar que l'àrea 1 ens indica novament el mateix problema que hem detectat en els edificis anteriors. S'observa una pujada de temperatura en el cantell del voladiu (llosana), on existeix un augment de 3 °C en comparació amb la resta de la façana. La línia 2 ens vol mostrar les diferents temperatures que pateix el mateix element constructiu al llarg de la seva secció. El punt 3 ens indica la temperatura del vidre. Cal destacar que en la finestra inferior

esquerra podem visualitzar una part del vidre a temperatura més elevada que la resta, es tracta simplement del reflex interior i exterior, que genera mesures confoses. A continuació s'exposa un gràfic de la línia 1 i el seu perfil corresponent, on es pot visualitzar amb claredat les diferents temperatures que existeixen en un mateix element constructiu, mostrant la baixa de temperatura en la planta inferior.

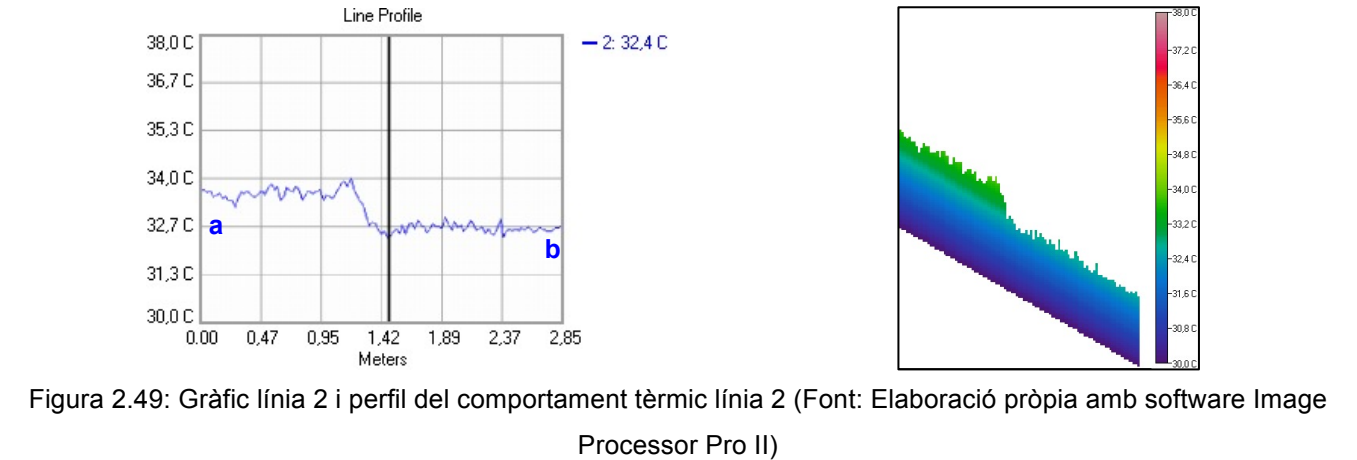


Figura 2.49: Gràfic línia 2 i perfil del comportament tèrmic línia 2 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

Seguidament es presenta un histograma del rectangle 1 i un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels). També s'exposa una imatge en 3D corresponent al termograma, on es poden detectar les diferents temperatures amb més facilitat:

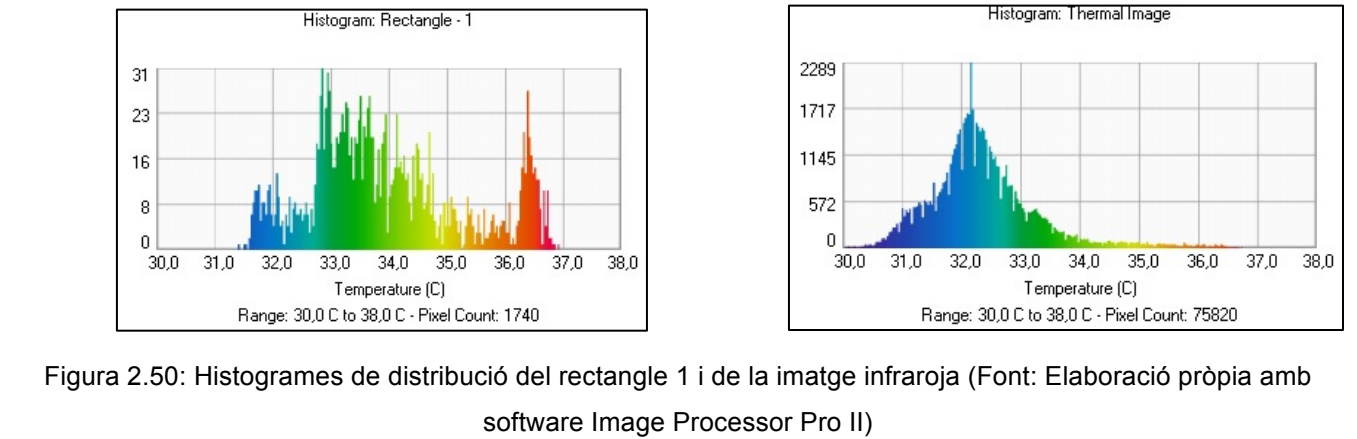


Figura 2.50: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

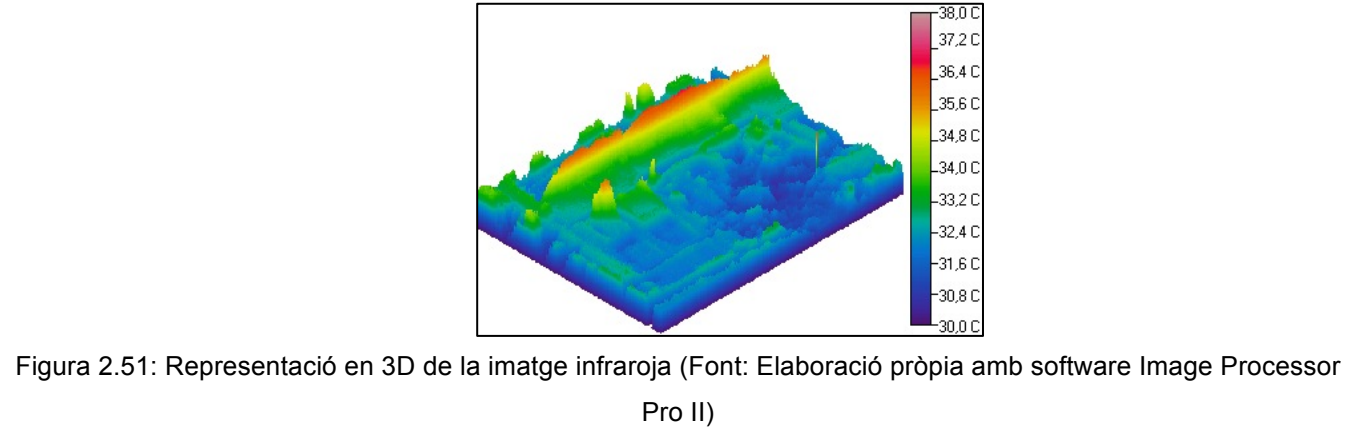
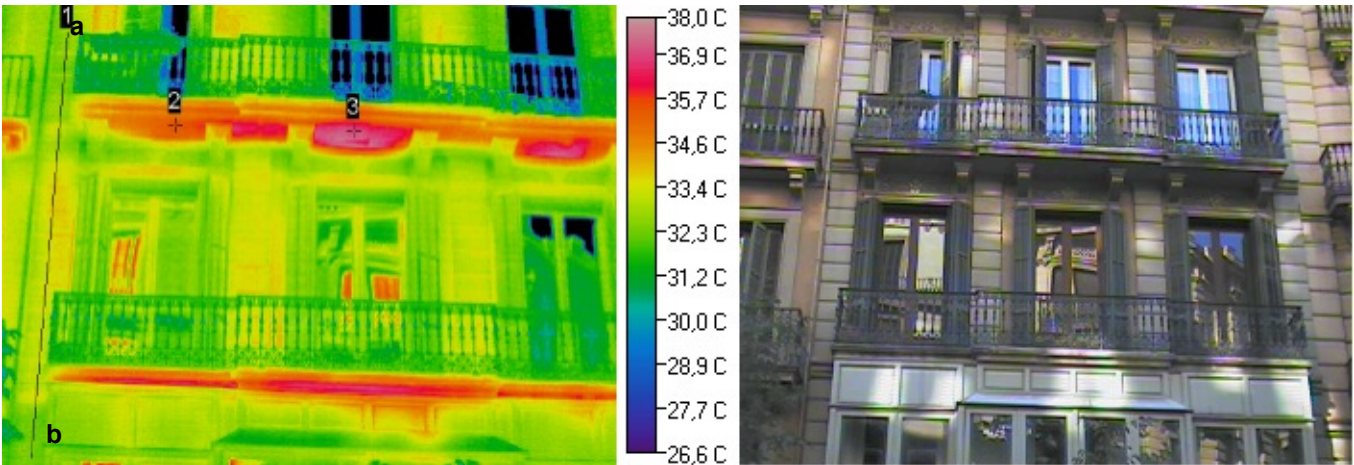


Figura 2.51: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 5:

- Ubicació:

FAÇANA SUD - EST / CARRER VALÈNCIA



Línia/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitjana	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Longitud
1	32,4 °C	34,4 °C	33,4 °C	0,93	30,2 °C	20 m	5,29 m
2	-	35,9 °C	-	0,93	30,2 °C	20 m	-
3	-	37,5 °C	-	0,93	30,2 °C	20 m	-

Aquest termograma fa referència al mateix edifici de la imatge termogràfica anterior, però amb la diferència de que podem visualitzar les temperatures de la façana de la planta tercera, la qual no estava enfocada anteriorment. En aquest cas s'ha ampliat el rang de temperatures, i s'ha col·locat una línia i dos punts en les zones més crítiques en relació a salts de temperatura.

La línia 1 s'ha col·locat per comprovar la temperatura que té un mateix element constructiu entre les plantes segona i tercera. A continuació s'exposa un gràfic i un perfil del recorregut d'aquesta línia, on es pot observar clarament els salts de temperatura que pateix aquest mateix element constructiu en la seva secció:

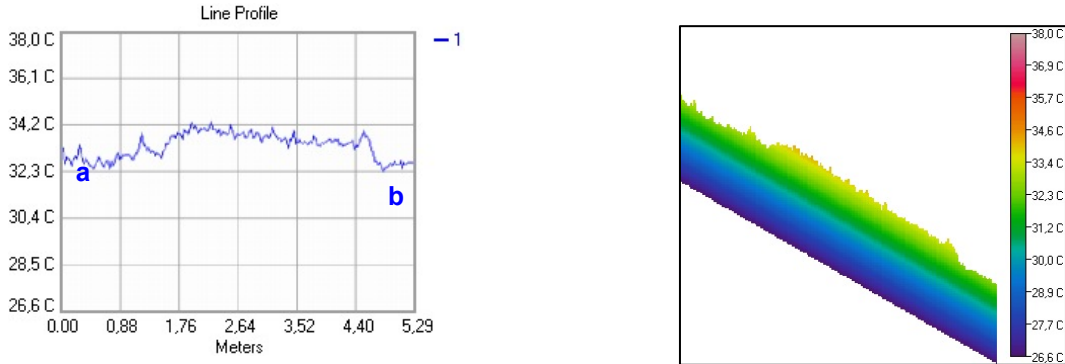


Figura 2.52: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

Els punts 2 i 3 corresponen a la temperatura de les llosanes dels balcons de la planta tercera, les quals es troben a temperatura elevada. No podem justificar aquestes diferències de temperatura, ja que no hem pogut accedir a les vivendes interiors per obtenir dades de temperatura de l'edifici. La manca de dades no permet extreure conclusions fiables, i per tant no es pot realitzar un correcte anàlisi termogràfic de l'edifici. Tot i això s'adjunta la secció tipus d'una façana de construcció tradicional, on es pot visualitzar el pont tèrmic.

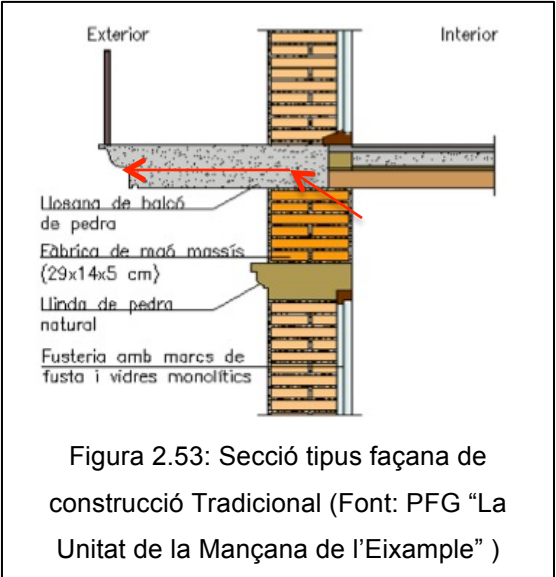


Figura 2.53: Secció tipus façana de construcció Tradicional (Font: PFG "La Unitat de la Mançana de l'Eixample")

Seguidament es presenta un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D corresponent al termograma, on es poden detectar les diferents temperatures de la façana amb més facilitat:

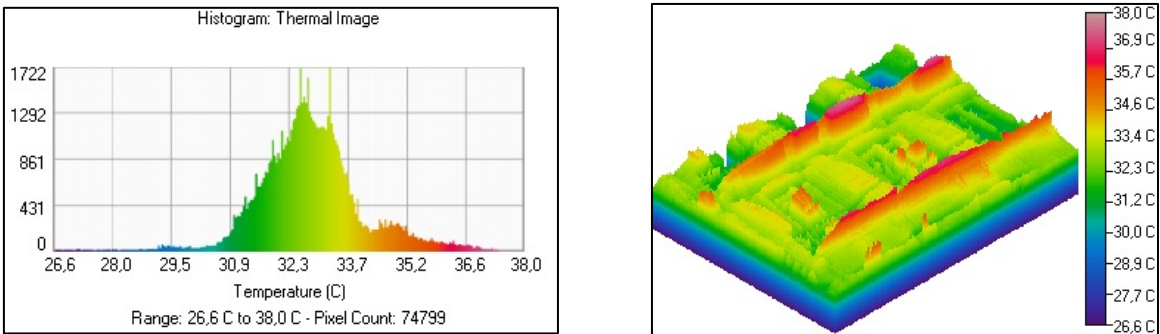
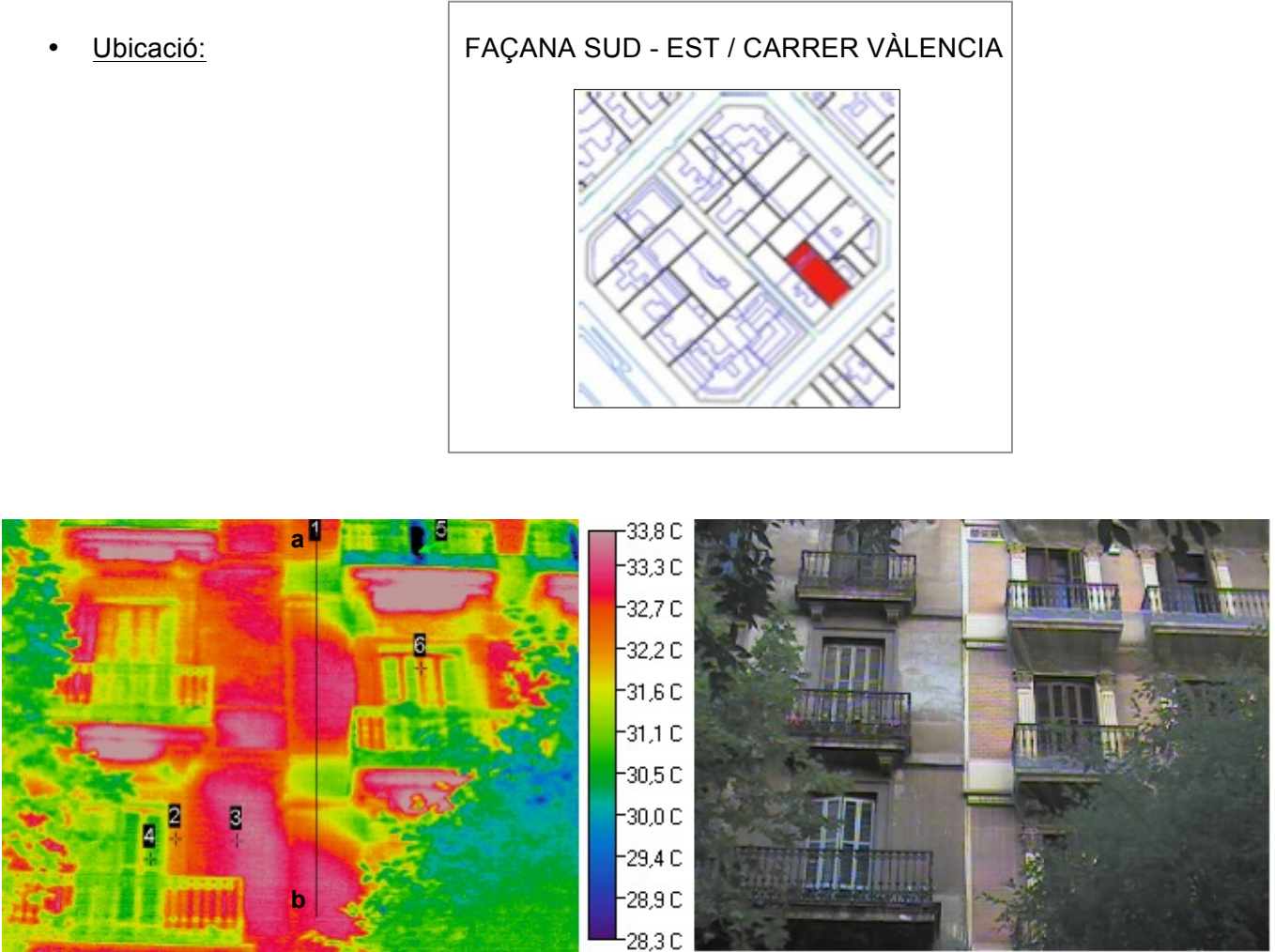


Figura 2.54: Histograma de distribució i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 6:



Línia/Punt	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitjana	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Longitud
1	31,1 °C	33,7 °C	32,7 °C	0,93	30 °C	20 m	5,10 m
2	-	32,5 °C	-	0,93	30 °C	20 m	-
3	-	33,6 °C	-	0,93	30 °C	20 m	-
4	-	31,1 °C	-	0,94	30 °C	20 m	-
6	-	32,5 °C	-	0,94	30 °C	20 m	-

L'edifici de la part dreta està format per PB + 5 PP, amb tres vivendes per planta, fent un total de 15 vivendes i un local comercial en PB. Els vidres són monolítics, i els marcs de fusta. En quant al revestiment, en PB trobem un aplacat de pedra natural, en planta primera un estucat imitant a la pedra i en planta segona, tercera i quarta un estucat imitant al maó. A l'última planta trobem un esgrafiats de color veig.

Amb el termograma podem observar que els elements ornamentals de pedra artificial i natural de la façana es troben a temperatura inferior que la resta del parament. Amb la línia 1 es vol mostrar

aquestes diferències de temperatura entre la façana i els elements ornamentals. Els altres punts de la imatge ens mostren diferents punts on la temperatura canvia notablement, i dels quals s'han volgut extreure les dades de temperatura. Tot i això no podem valorar les diferents temperatures que s'observen en la façana, ja que no s'ha pogut accedir a les vivendes interiors per obtenir dades de temperatura de l'edifici.

A continuació s'exposa un gràfic de la línia 1 i el seu perfil corresponent, on es pot visualitzar amb claredat les diferents temperatures que existeixen en un mateix element constructiu, mostrant la baixa de temperatura en la planta inferior.

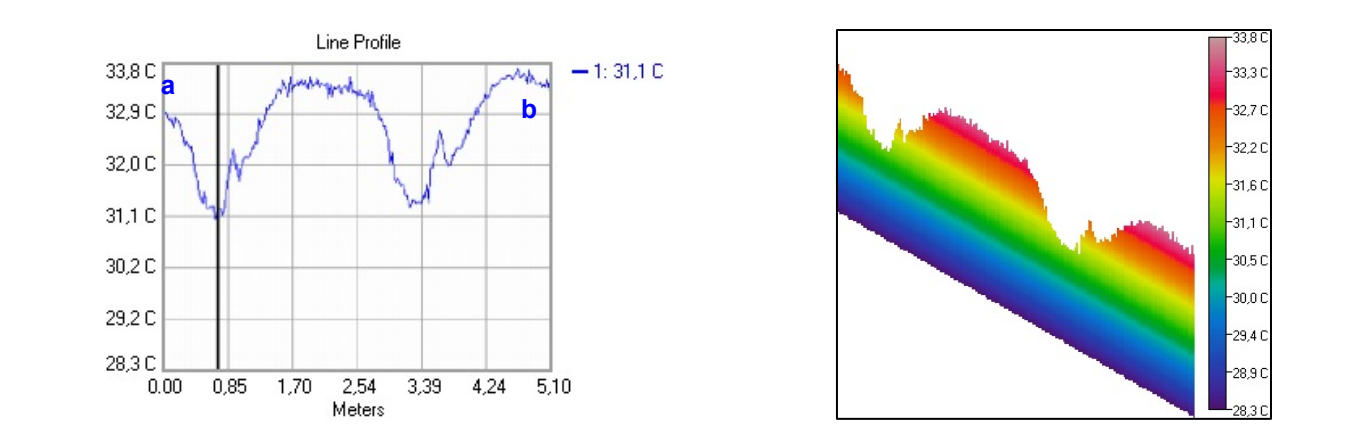


Figura 2.55: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

Seguidament es presenta un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D corresponent al termograma, on es poden detectar les diferents temperatures de la façana amb més facilitat:

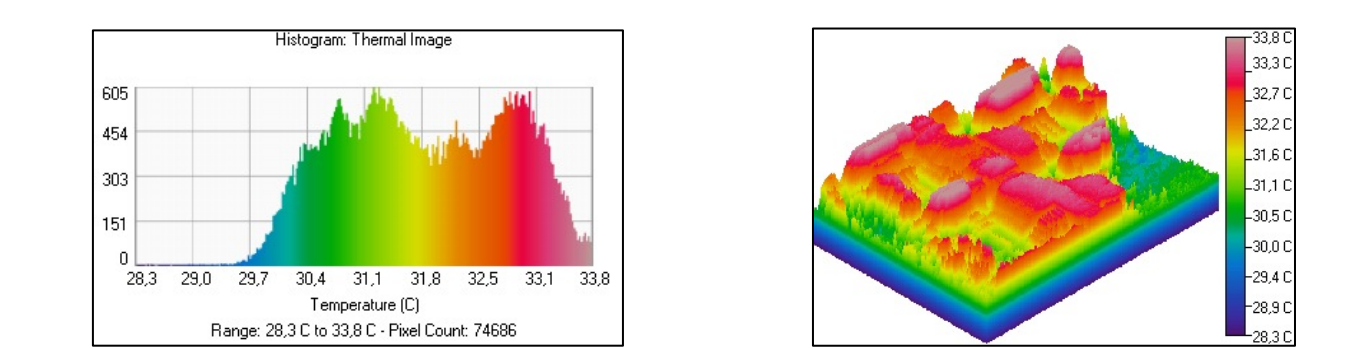
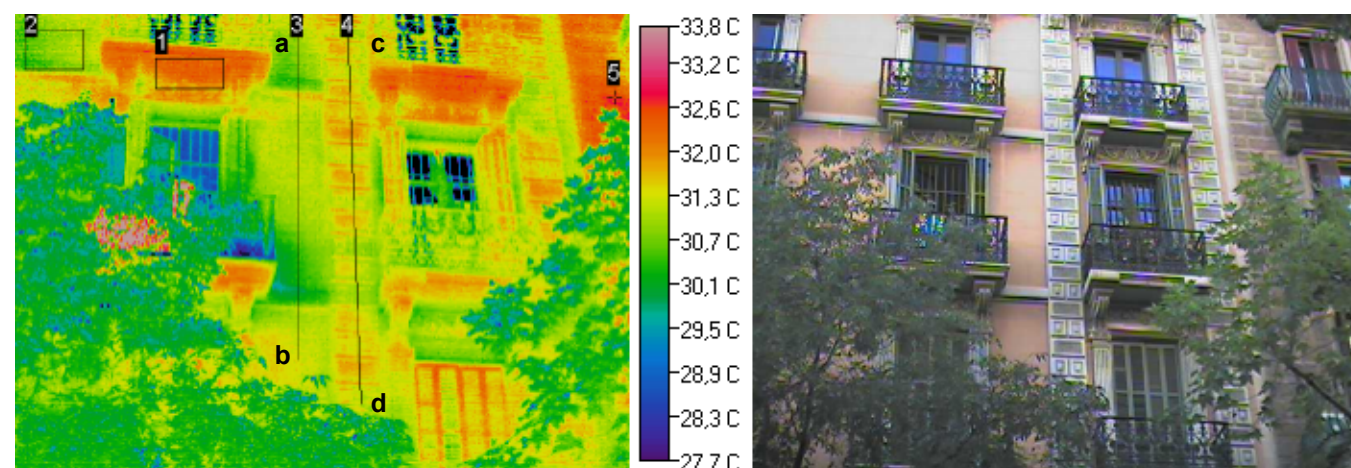


Figura 2.56: Histograma de distribució i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 7:

- Ubicació:

FAÇANA NORD / CARRER DE PAU CLARIS



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	31,5 °C	32,9 °C	32,4 °C	0,93	30,1 °C	20 m	0,33 m ² /6,48
2	30,1 °C	31,6 °C	31 °C	0,93	30,1 °C	20 m	0,37 m ² /2,61
3	29,9 °C	31,9 °C	31 °C	0,93	30,1 °C	20 m	4,12 m
4	30,8 °C	32,3 °C	31,5 °C	0,93	30,1 °C	20 m	4,74 m
5	-	33,8 °C	-	0,67	30,1 °C	20 m	-

Aquest edifici està format per PB + 5 PP, amb 2 vivendes per planta, fent un total de de 10 vivendes i 2 locals comercials en PB. Suposem que es produeixen pèrdues energètiques per algunes finestres, ja que estan compostes per vidres monolítics i marcs de fusta, però no podem extreure conclusions fiables, ja que els reflexes interiors i exteriors dificulten els resultats. Cal destacar que a l'any 1999 es

va realitzar una restauració integral de la façana, i a l'any 2007 es van substituir els vidres i les fusteries de dos finestres de la dreta de la planta primera.

Els rectangles 1 i 2 ens mostren zones on s'observa una temperatura més alta o més baixa en relació amb la temperatura general de la façana, i dels quals hem volgut extreure més dades.

Les línies 3 i 4 ens volen demostrar les diferents temperatures que pateix un mateix element constructiu en els diferents nivells de la façana.

A continuació s'exposa un gràfic de la línia 3 i 4 i el seu perfil corresponent, on es pot visualitzar amb claredat les diferents temperatures que existeixen en un mateix element constructiu, així com els histogrames del rectangle 1 i 2 i de la imatge infraroja:

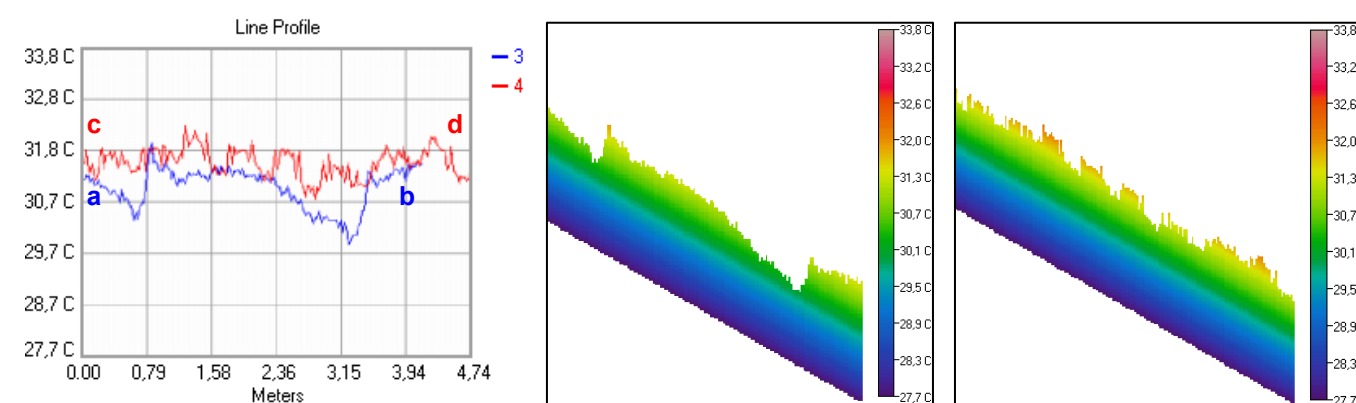


Figura 2.57: Gràfic línia 3 i 4 i perfil del comportament tèrmic línia 3 i 4 respectivament (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

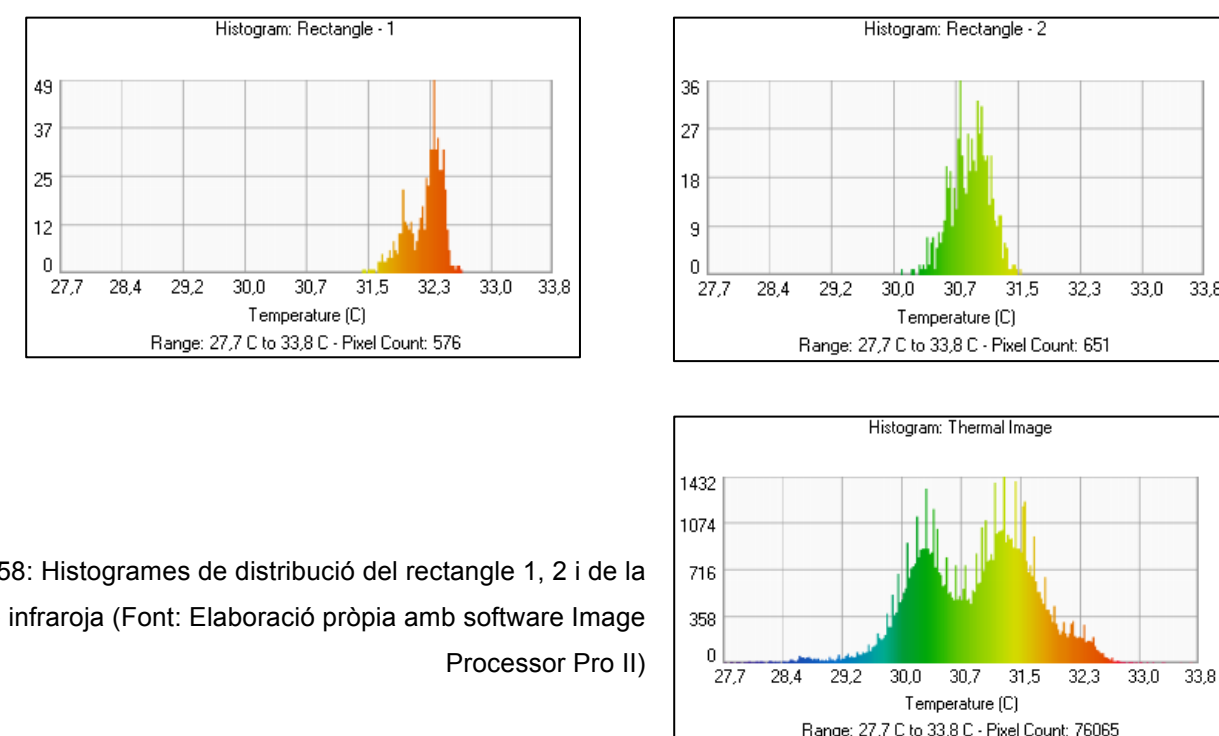
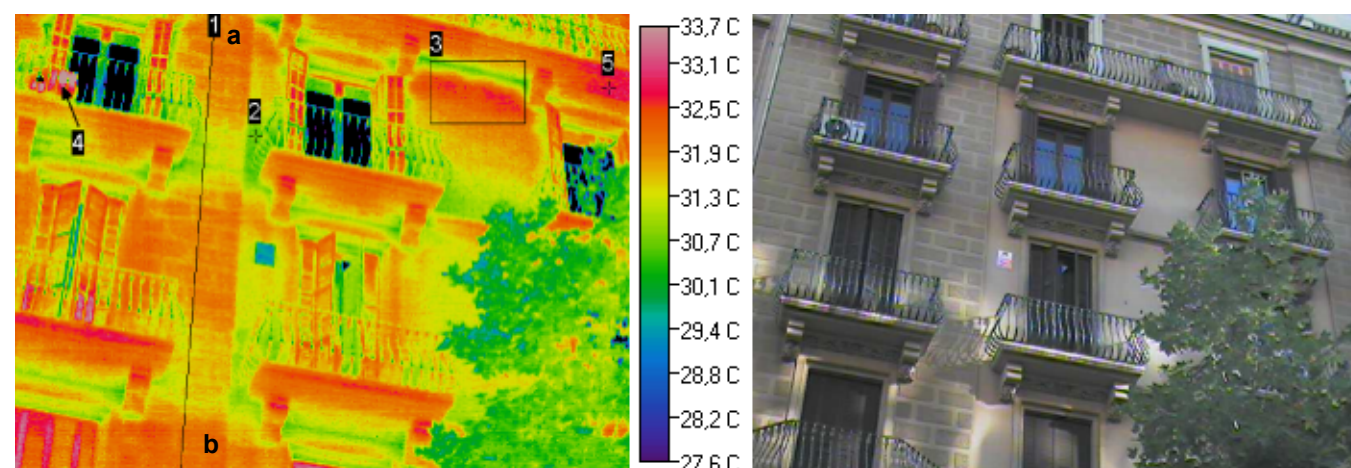


Figura 2.58: Histogrames de distribució del rectangle 1, 2 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 8:

- Ubicació:

FAÇANA NORD / CARRER DE PAU CLARIS



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	31,6 °C	33,7 °C	32,9 °C	0,67	29,4 °C	20 m	5,70 m
2	-	30,7 °C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-
3	30,3 °C	33,1 °C	32,1 °C	0,93	29,4 °C	20 m	0,95m ² /21,38
5	-	33,1 °C	-	0,67	29,4 °C	20 m	-

L'edifici està format per PB + 5PP, amb 2 vivendes per planta, fent un total de 10 vivendes i a PB trobem 1 local comercial i 1 pàrquing. Hi han 4 finestres que han estat substituïdes, sense seguir la coherència i estètica de la façana, per fusteries d'alumini i vidres dobles. Al 1986 es van realitzar diverses reformes interiors.

En referència al termograma, la línia 1 ens indica les diferents temperatures en la façana, on es poden observar les baixades de temperatura en algunes zones del parament (veure figura 2.59 on es pot

observar amb claredat els salts tèrmics que es produeixen). El punt 2 ens marca una part on la temperatura disminueix en comparació amb la temperatura mitja de la façana. El rectangle 3 ens assenyala la zona inferior a la llosana, on es pot observar un descens de temperatura important, degut a l'ombra que provoca el mateix en el parament. La fletxa 4 ens indica la màquina condensadora d'aire condicionat, la qual es troba a temperatura elevada, ja que es troba en funcionament i agafa l'aire calent exterior per transformar-lo en aire fred. El punt 5 ens mostra una zona on la temperatura és màxima, però no podem extreure conclusions ja que necessitem dades de temperatura interior de l'edifici, per poder valorar correctament aquestes diferències de temperatura.

A continuació s'exposa un gràfic de la línia 1 i el seu perfil corresponent, on es pot visualitzar amb claredat les diferents temperatures que existeixen en un mateix element constructiu, així com els histogrames del rectangle 3 i de la imatge infraroja:

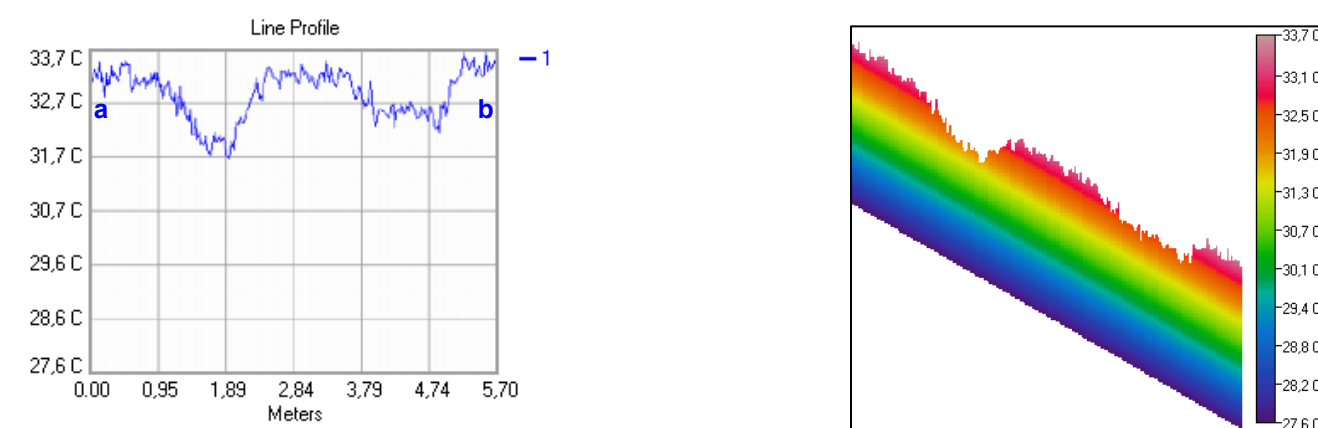


Figura 2.59: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

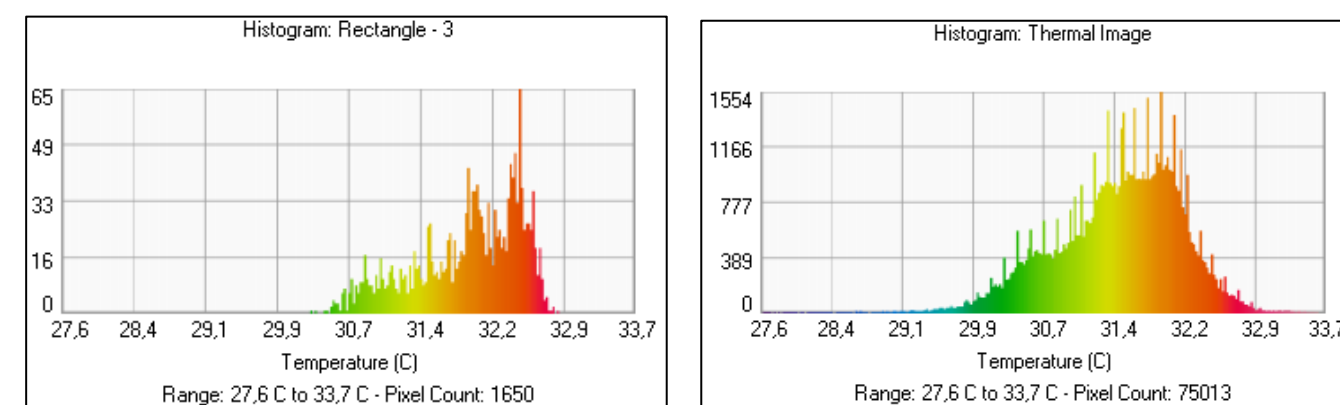
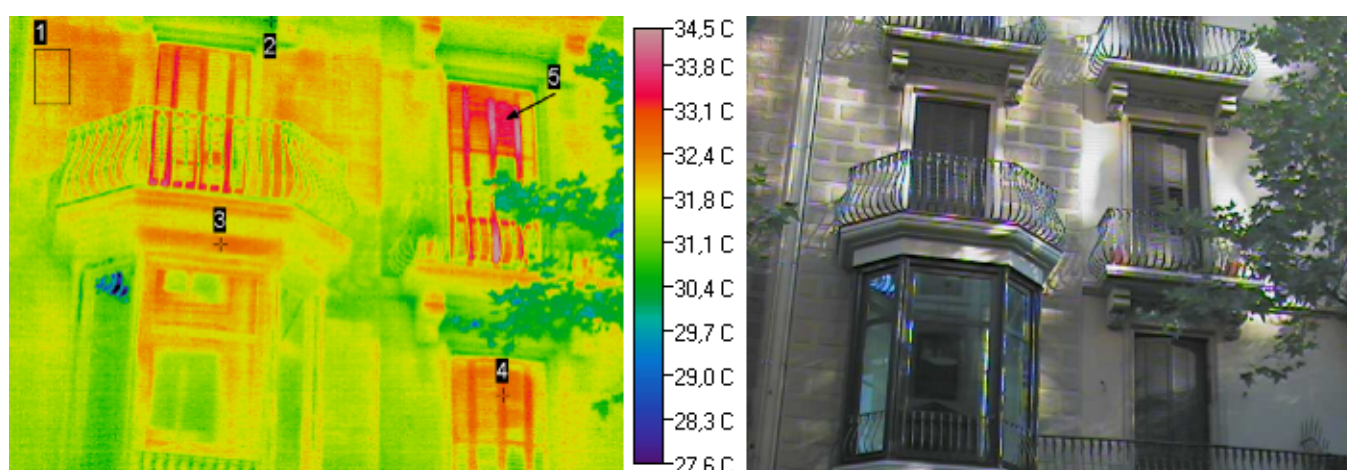


Figura 2.60: Histogrames de distribució del rectangle 3 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 9:

- Ubicació:

FAÇANA NORD / CARRER DE PAU CLARIS



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	33 °C	34,4 °C	33,6 °C	0,67	29,4 °C	20 m	0,32 m ² /11,52
2	-	30,4 °C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-
3	-	32,8 °C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-
4	-	33,1 °C	-	0,94	29,4 °C	20 m	-

Aquest edifici està format per PB + 5 PP + àtic + sobreàtic, amb 2 vivendes per planta, fent un total de 14 vivendes i 2 locals comercials en PB. A l'any 2002 es va restaurar la façana i els patis interiors i a l'any 2006 es van reparar els balcons i les tribunes.

En aquest termograma podem observar les irregularitats de temperatura que pateix la façana d'aquest edifici. El rectangle 1 ens indica la temperatura de la façana de la planta segona, la qual és més elevada que la planta primera, i es reflexa per la manca d'aïllament en la façana. El punt 2 ens mostra la temperatura de la llosana dels balcons de la planta tercera, els quals estan a temperatura inferior en

comparació amb les llosanes dels edificis anteriors analitzats. El punt 3 ens indica la llosana del balcó de la planta segona la qual té una temperatura més elevada. El punt 4, ens mostra la temperatura de les lamel·les de protecció solar de fusta, on la part superior està a més temperatura que la part inferior. I finalment la fletxa 5, ens mostra una finestra, on la part de les lamel·les tancades està a temperatura molt elevada, en comparació amb la part inferior on les lamel·les estan obertes i la temperatura disminueix notablement. Si ens fixem en els perfils de fusta que composem aquests elements de protecció solar podem comprovar que estan a temperatura elevada. No podem analitzar correctament a que són deguts aquests canvis de temperatura, ja que necessitem dades de temperatura interior de l'edifici.

Seguidament es presenten dos histogrames, un histograma corresponent al rectangle 1 i l'altre relacionat amb la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels). També s'exposa una imatge en 3D corresponent al termograma, on es poden detectar les diferents temperatures de la façana amb més facilitat:

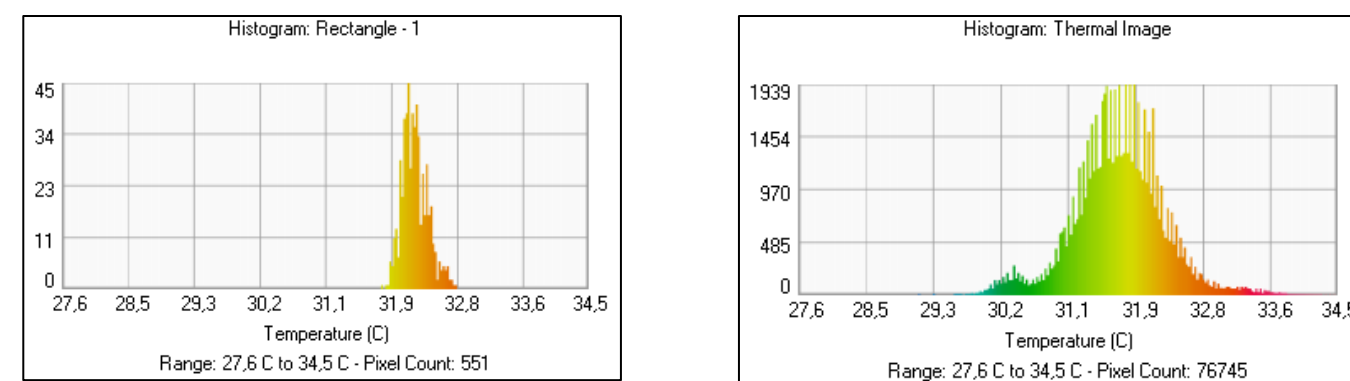


Figura 2.61: Histogrames de distribució del rectangle 1 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

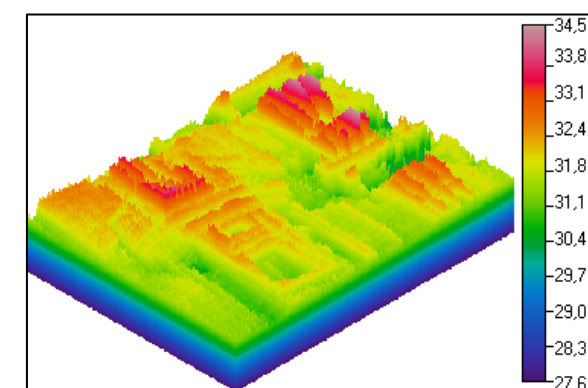
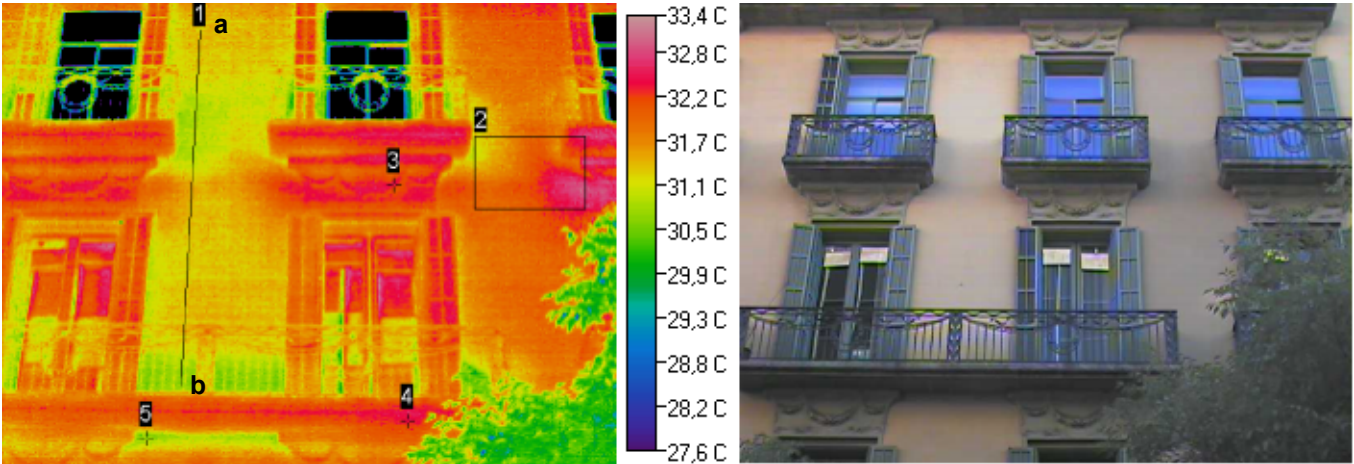


Figura 2.62: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 10:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	30,7 °C	31,9 °C	31,4 °C	0,93	29,4 °C	20 m	4,43 m
2	31,2 °C	33,4 °C	32,3 °C	0,93	29,4 °C	20 m	1,27m²/30,41
3	-	32,7°C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-
4	-	32,7°C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-
5	-	30,8 °C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-

En aquest termograma la línia 1 ens indica com disminueix la temperatura de la façana en la part dels balcons. Amb el gràfic següent es pot visualitzar aquesta disminució de temperatura:



Figura 2.63: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

L'àrea 2 ens indica una mateixa zona de la façana on podem trobar 2 °C de diferència de temperatura.

Els punts 3 i 4 ens mostren la temperatura elevada de les llosanes dels balcons, i les llindes de les finestres. I el punt 5 ens assenyalava la zona inferior del voladiu la qual es troba ombrejada pel mateix, i genera un descens de la temperatura. No podem analitzar correctament el motiu de les diferents temperatures, ja que necessitem dades de temperatura interior de l'edifici, al qual no hem pogut accedir ja que es tracten de vivendes particulars, però pel sistema constructiu tradicional de la façana, podem preveure que existeixen ponts tèrmics per les llosanes i la llinda de les finestres.

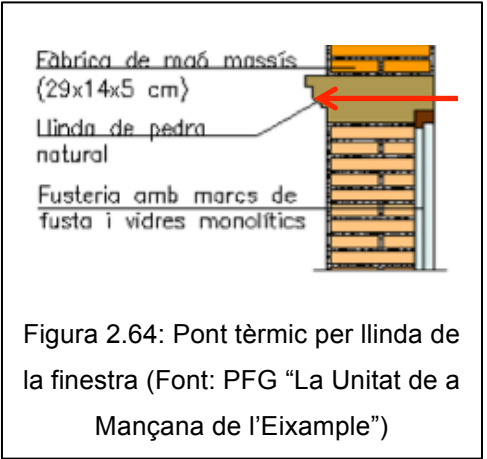


Figura 2.64: Pont tèrmic per llinda de la finestra (Font: PFG “La Unitat de a Mançana de l'Eixample”)

Seguidament es presenten dos histogrames, un d'ells corresponent al rectangle 2 i l'altre relacionat amb la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels):

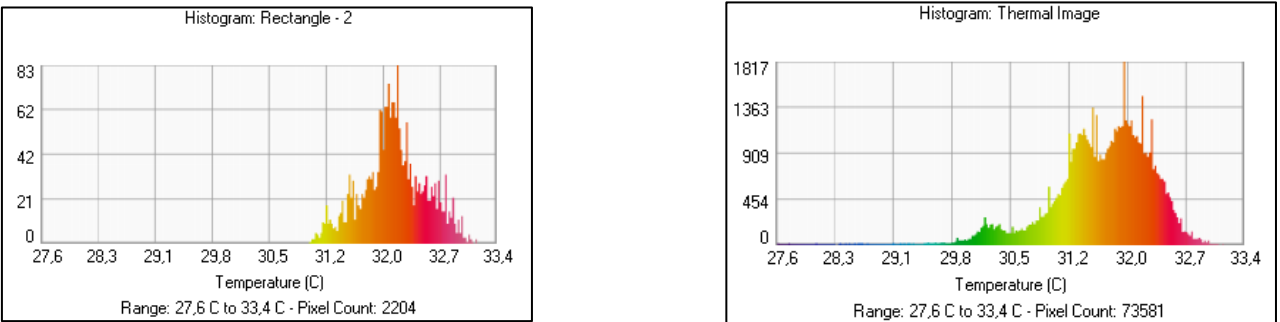
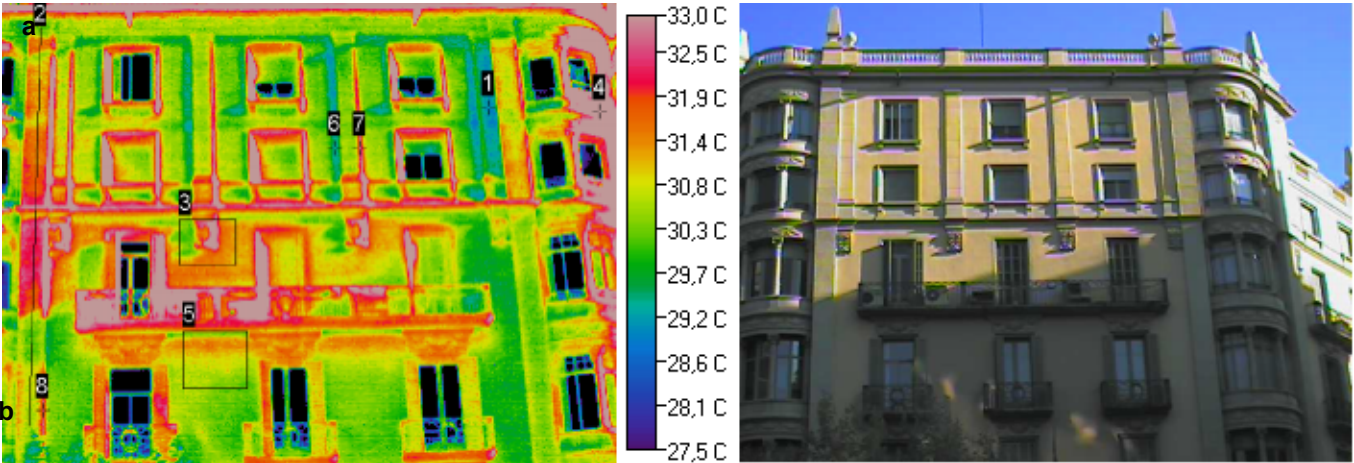
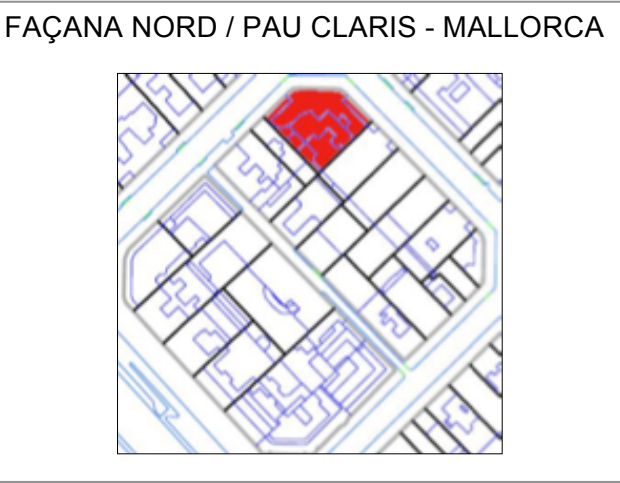


Figura 2.65: Histogrames de distribució del rectangle 2 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 11:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	Tº. Mín	Tº. Màx	Tº. Mitja	Emissivitat	Tº. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	-	29,2 °C	-	0,93	30 °C	30 m	-
2	30,1 °C	33,6 °C	31,5 °C	0,93	30 °C	30 m	7,44 m
3	30 °C	36,1 °C	31,7 °C	0,93	30 °C	30 m	0,93m²/12,57
4	-	38°C	-	0,93	30 °C	30 m	-
5	30,1 °C	32 °C	31 °C	0,93	30 °C	30 m	1,32m²/9,95
6	-	29,4 °C	-	0,93	30 °C	30 m	-
7	-	32,8 °C	-	0,93	30 °C	30 m	-
8	-	32,7 °C	-	0,93	30 °C	30 m	-

Aquest edifici compost de PB + 6 PP, es tracta d'un immoble de deu habitatges i quatre locals. Observem que existeixen ponts tèrmics en la fusteria de fusta de color verd i suposem que pels vidres també es produeixen pèrdues energètiques, ja que es tracten de vidres monolítics simples, però que

degut als reflexes exteriors i interiors no podem analitzar amb la càmera termogràfica. Podem observar un augment de temperatura en els brancals, llindes i ampits de les finestres, els quals són de pedra artificial i natural, així com en tota la ornamentació realitzada amb el mateix material. Les irregularitats de temperatura que es poden visualitzar en el termograma són degudes a que es tracta d'una façana sense aïllament tèrmic, i amb la presència de ponts tèrmics (veure figura 2.66).

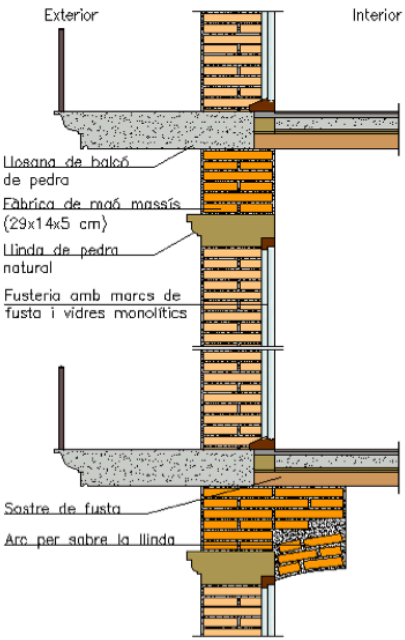


Figura 2.66: Secció tipus de la façana de Construcció Tradicional (Font: PFG “La Unitat de la mançana de l'Eixample”).

A continuació s'exposa un gràfic de la línia 1 i el seu perfil corresponent, on es pot visualitzar amb claredat les diferents temperatures que existeixen en un mateix element constructiu, així com els histogrames del rectangle 3 i 5 i de la imatge infraroja:

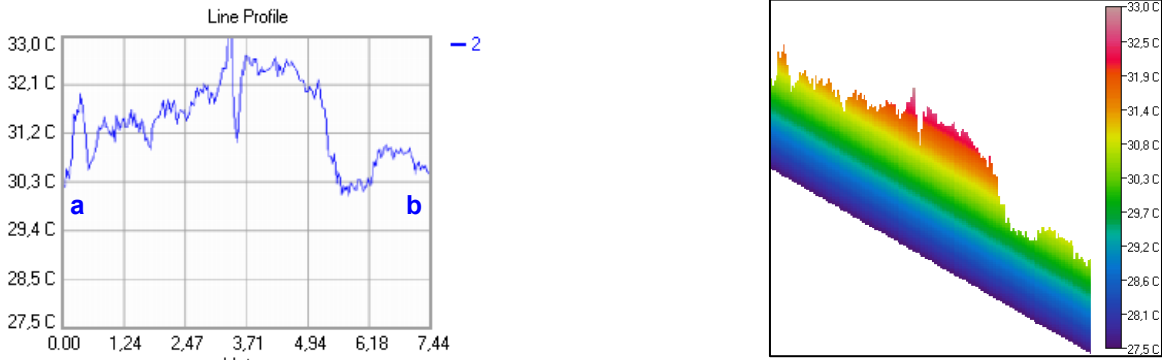


Figura 2.67: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

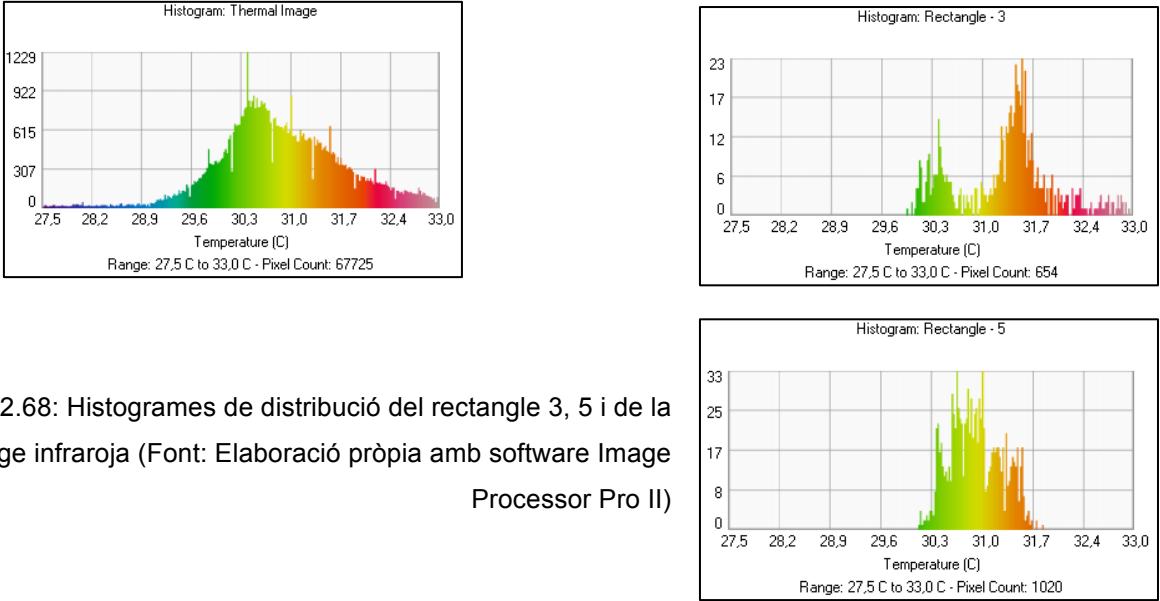
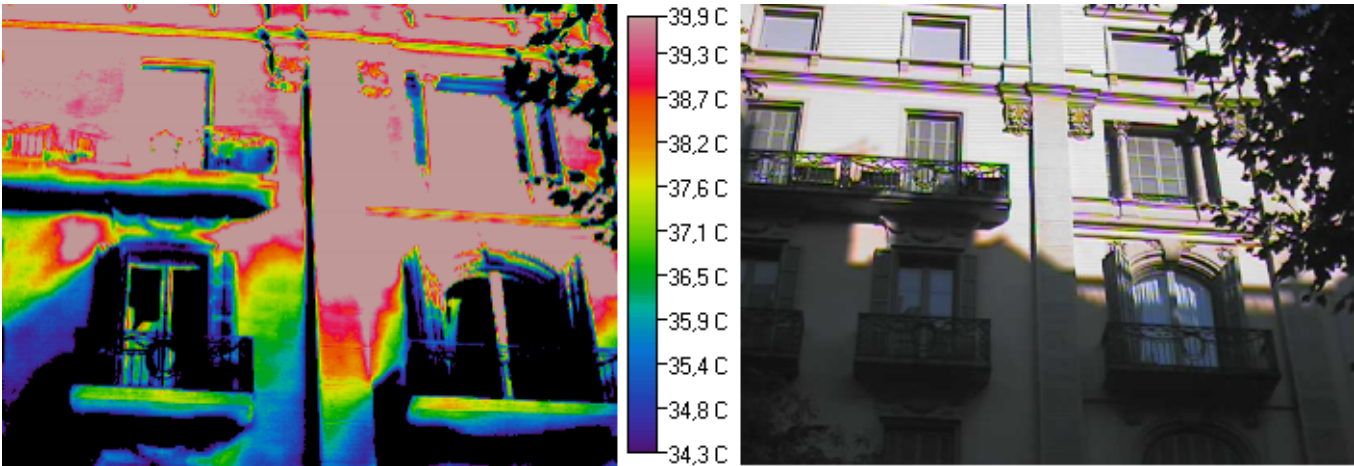
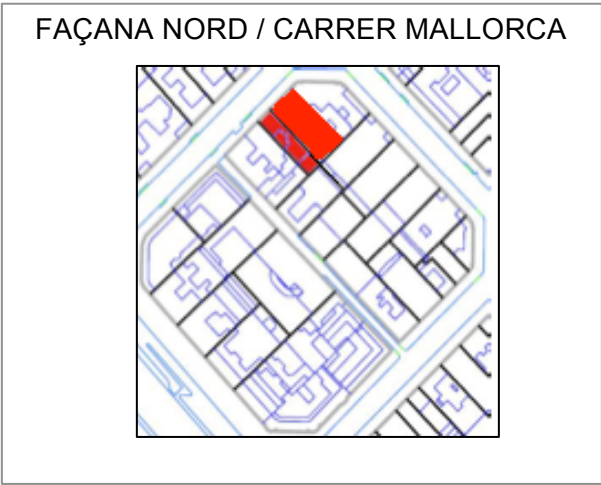


Figura 2.68: Histogrames de distribució del rectangle 3, 5 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 12:

- Ubicació:

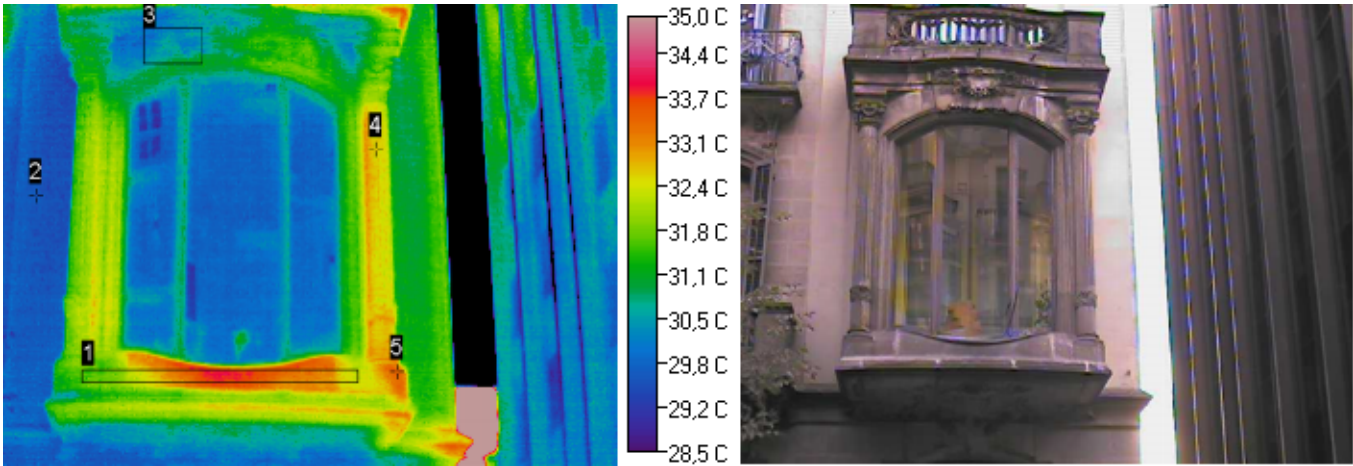
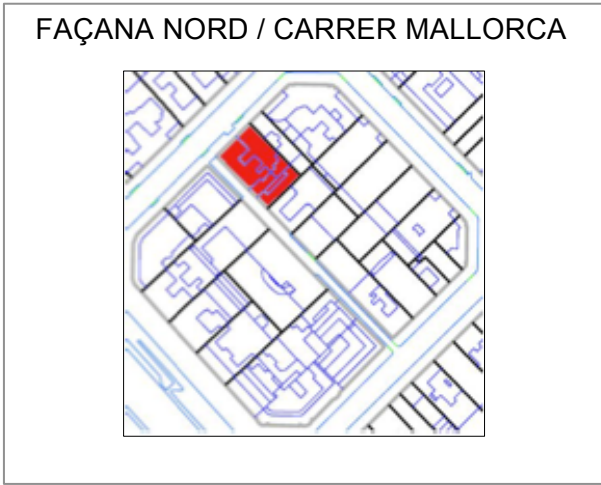


Aquest termograma és un clar exemple de com afecta el Sol en la presa d'una imatge infraroja. Com ja sabem la superfície de l'objecte a mesurar a d'estar lliure de fonts d'interferència òptiques i tèrmiques. Les reflexions es mouen, mentre que les característiques tèrmiques es mantenen encara que en canviï el punt de vista. En aquest cas per determinar si es tracta d'un reflex solar o d'un punt calent, el que vam realitzar va ser la presa de diferents termografies amb diferents angles d'incidència i en moments diferents, ja que en el moment de la presa del termograma el Sol es trobava incidint en la façana superior, però l'arbrat i els edificis frontals creaven ombra en la façana inferior.

Es va comprovar que la part inferior de l'edifici sempre té una temperatura inferior a la part superior, degut a la constant ombra que creen els edificis frontals i els arbres, però la temperatura superior de la façana ens donava mesures confoses ja que es tractava d'una zona assolellada amb acumulació de calor, afectant a la temperatura de la seva superfície.

TERMOGRAMA 13:

- Ubicació:



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	31,5 °C	34,3 °C	33,2 °C	0,95	29,4 °C	20 m	0,58 m²/20,81
2	-	29,7 °C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-
3	29,8 °C	31,5 °C	30,5	0,95	29,4 °C	20 m	0,34 m²/3,09
4	-	32,9 °C	-	0,95	29,4 °C	20 m	-
5	-	33,6 °C	-	0,95	29,4 °C	20 m	-

L'edifici està format per PB + 5 PP, amb un total de 3 vivendes, 8 oficines i 2 locals en planta baixa. En aquest termograma no podem valorar la mesura obtinguda del vidre, ja que existeixen reflexes interiors que dificulten el resultat obtingut.

En relació amb el rectangle 1 corresponent a l'ampit de la finestra compost per pedra natural observem una pujada de temperatura en la zona central. El punt 2 ens indica la temperatura que té la façana, la qual es troba a la mateixa temperatura que la temperatura ambient, mentre que els punts 4 i 5 corresponen al pilar lateral de la finestra, el qual es troba a més temperatura. No podem extreure

conclusions fiables ja que no tenim mesures de la temperatura interior de l'edifici, i això ens limita en poder realitzar un correcte anàlisi termogràfic de la zona inspeccionada.

Seguidament es presenten dos histogrames corresponents als rectangles 2 i 3, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels):

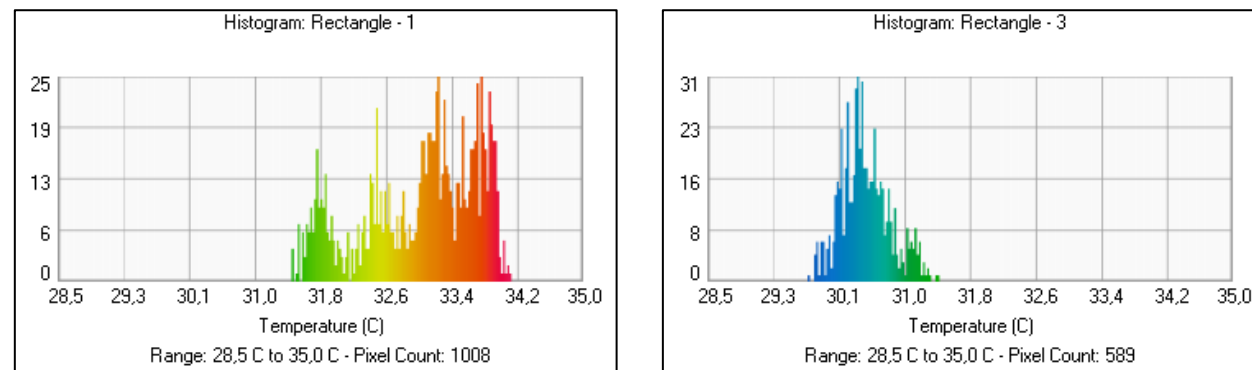


Figura 2.69: Histogrames de distribució del rectangle 2 i 3 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

A continuació s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D corresponent al termograma, on es poden detectar les diferents temperatures de la façana amb més facilitat:

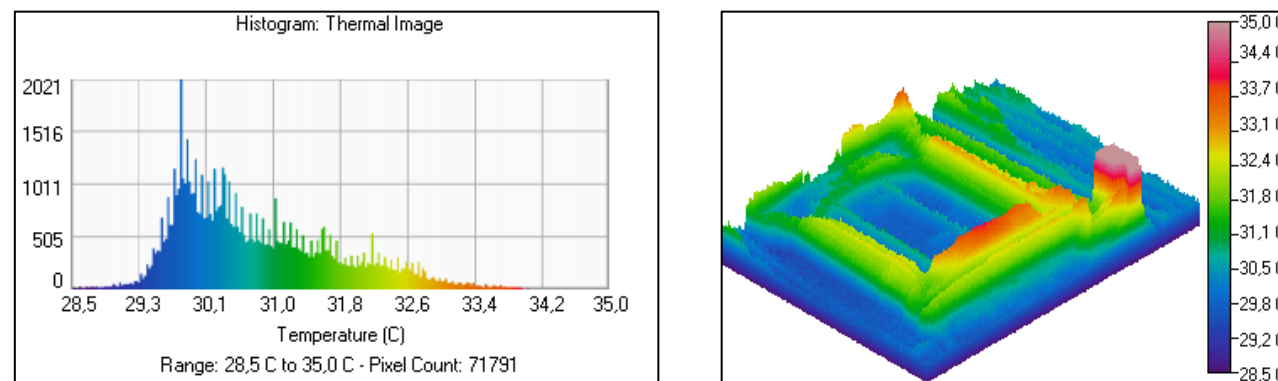
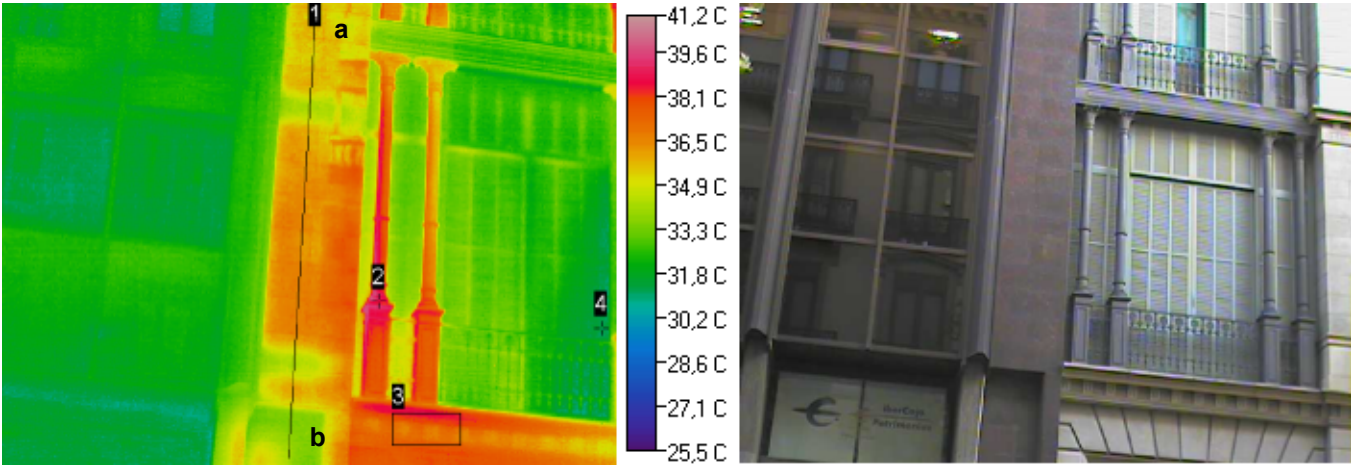


Figura 2.70: Histograma de distribució i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 14:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	33,9 °C	37,5 °C	36,1 °C	0,95	29,4 °C	20 m	5,49 m
2	-	39,2 °C	-	0,95	29,4 °C	20 m	-
3	37,1 °C	39,7°C	38,2 °C	0,93	29,4 °C	20 m	0,35m ² /29,90
4	-	31,3 °C	-	0,94	29,4 °C	20 m	-

L'edifici esquerra està format per 3 PS + PB + 8 PP, i el seu ús és exclusiu d'oficines. La façana és de mur cortina amb obertures fixes. Ens trobem en la situació de que els reflexes exteriors de l'edifici de davant ens dificulten la interpretació de la imatge, i no podem valorar la temperatura d'aquesta part de la façana.

Tot i això, la línia 1 ens indica la part lateral de l'edifici revestit amb un aplanat discontinu, el qual es troba a més temperatura que la resta de la façana. Amb aquesta línia podem observar els salts tèrmics

que succeeixen vers tot l'element constrictiu. Per facilitar aquesta interpretació a continuació s'exposa el gràfic i el perfil corresponent a la línia 1:

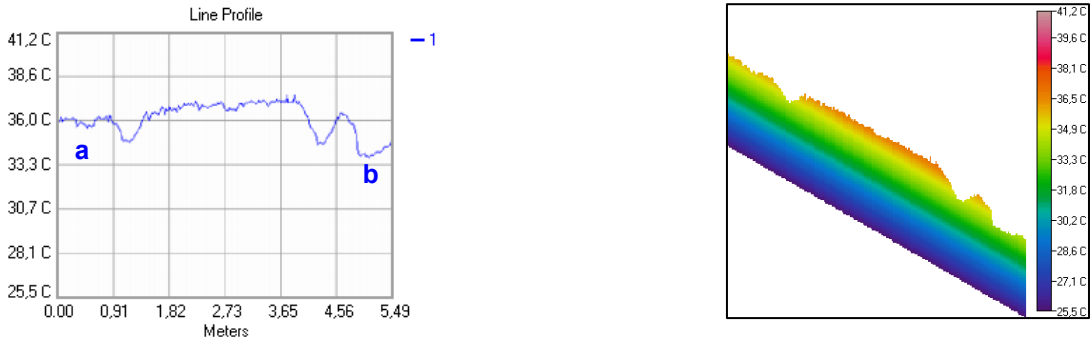


Figura 2.71: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

El punt 2 ens mostra les columnes de les finestres de l'edifici dret, les quals es troben a temperatura elevada, i suposem que és degut a l'acumulació de la radiació solar rebuda durant el dia. En la mateixa línia l'àrea 3 ens assenyalava la cornisa, que es troba a aproximadament a la mateixa temperatura que les columnes.

El punt 4 ens indica la temperatura de les lamel·les de fusta del finestral, les quals es troben tancades.

Seguidament es presenten dos histogrames, un histograma corresponent al rectangle 3 i l'altre relacionat amb la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels). També s'exposa una imatge en 3D corresponent al termograma, on es poden detectar les diferents temperatures de la façana amb més facilitat:

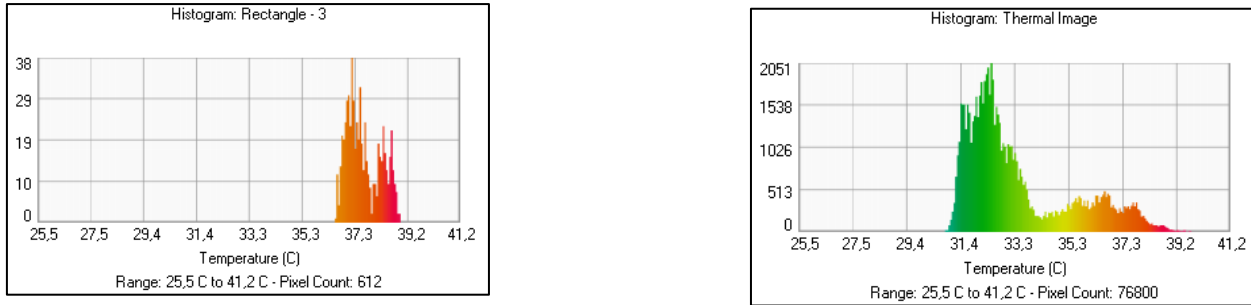


Figura 2.72: Histogrames de distribució del rectangle 3 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

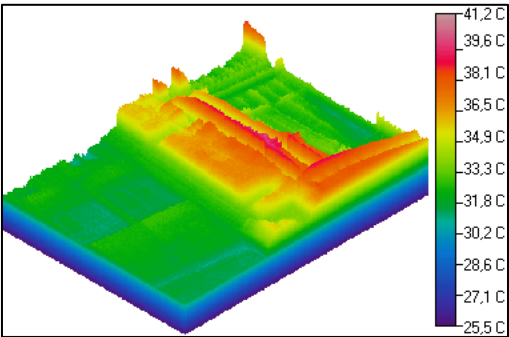
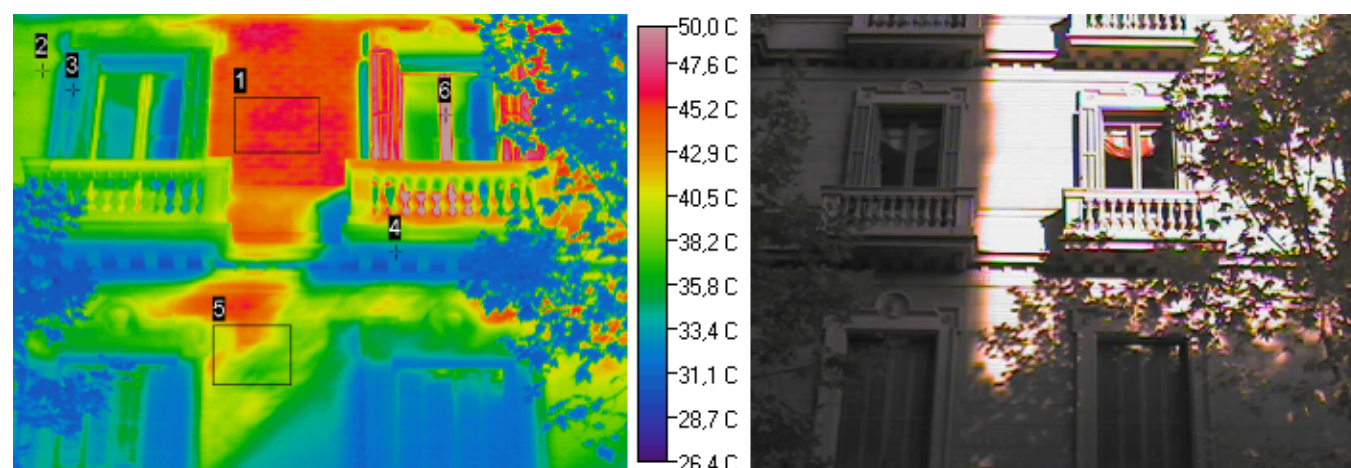


Figura 2.73: Representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 15:

- Ubicació:

FAÇANA NORD / CARRER MALLORCA



Àrea/Punt	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts
1	45,5 °C	47,8 °C	46,9 °C	0,93	29,4 °C	20 m	0,75m²/131,38
2	-	39 °C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-
3	-	33,1 °C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-
4	-	32,8°C	-	0,93	29,4 °C	20 m	-
5	37,2 °C	45,5 °C	40,5 °C	0,93	29,4 °C	20 m	0,73 m²/76,40
6	-	50,6 °C	-	0,94	29,4 °C	20 m	-

En aquest termograma s'observa que la zona il·luminada pels raigs solars es troben a més temperatura que la zona ombrejada. La radiació solar provoca un sobreescalfament de la façana, i ens genera mesures confoses. Amb aquesta termografia podem observar l'efecte que crea l'arbrat i els edificis frontals en la façana creant ombra i provocant un descens de temperatura.

Si observem la imatge infraroja podem comprovar que s'han col·locat diferents àrees i punts per estudiar detalladament aquests canvis de temperatura.

Tot i això, per extreure conclusions fiables s'ha de tenir present que la radiació solar emmagatzema calor durant hores en la façana, i s'ha de comprovar que no ens generi un punt calent erroni. És preferible que en aquestes situacions, es realitzin les fotografies a diferents hores del dia, per comprovar que les mesures obtingudes són correctes.

A continuació es presenten dos histogrames corresponents als rectangles 1 i 5, on s'observen les diferents temperatures de la façana, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), s'ha de tenir en compte que la mesura està sobre valorada pels raigs solars.

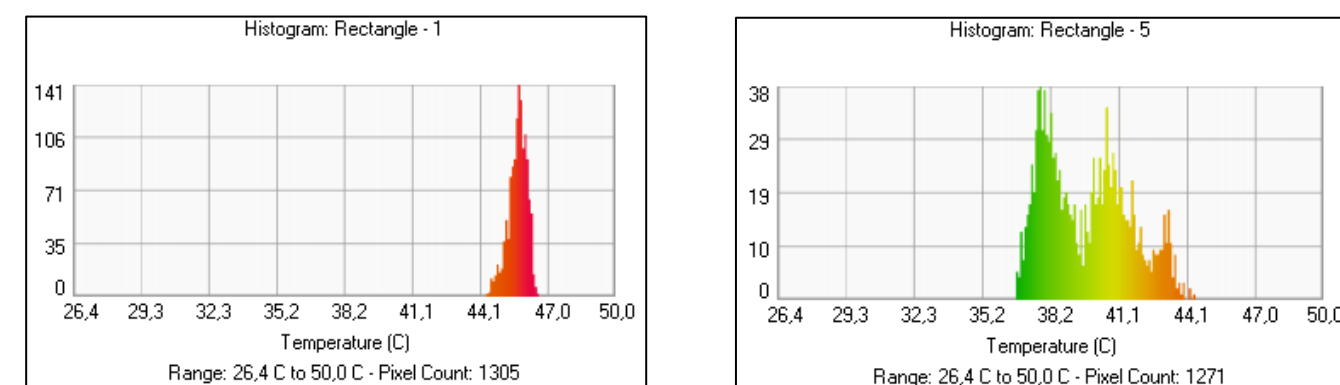


Figura 2.74: Histogrames de distribució del rectangle 1 i del rectangle 5 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

A continuació s'exposa un histograma corresponent a la imatge infraroja, on s'observen les diferents temperatures que té l'edifici, en relació amb els píxels (temperatura de cadascun dels píxels), i una imatge en 3D corresponent al termograma, on es poden detectar les diferents temperatures de la façana amb més facilitat:

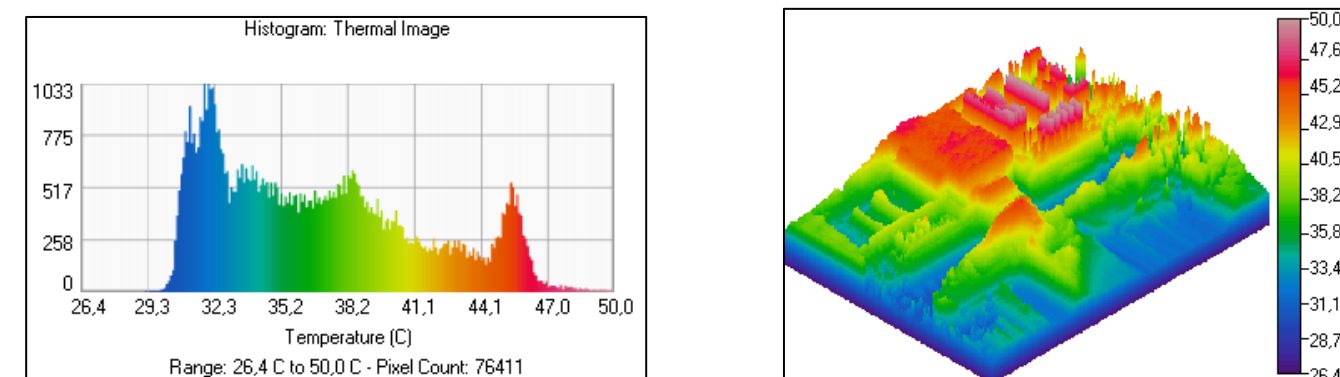
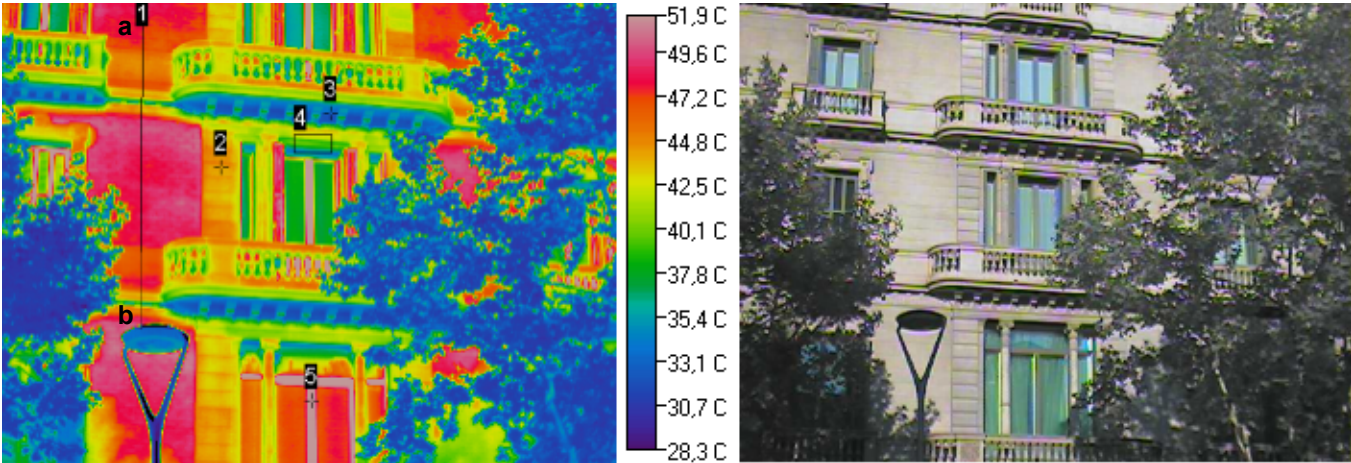
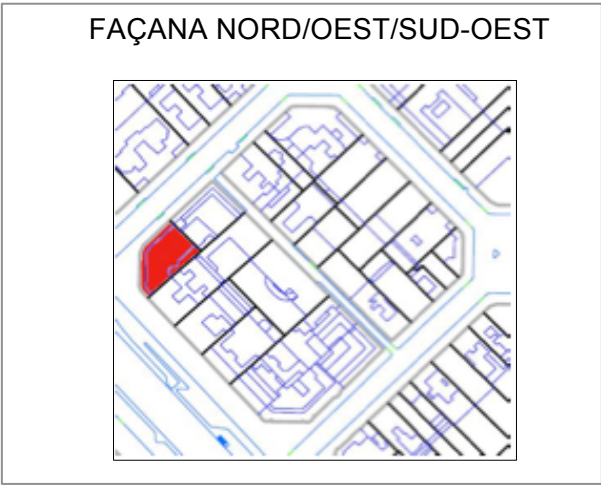


Figura 2.75: Histograma de distribució i representació en 3D de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 16:

- Ubicació:



Àrea/Punt/ Línia	T°. Mín	T°. Màx	T°. Mitja	Emissivitat	T°. ambient	Distància	Àrea/ Watts/ Longitud
1	31,9 °C	52 °C	48,3 °C	0,93	28 °C	30 m	5,79 m
2	-	45,2 °C	-	0,95	28 °C	30 m	-
3	-	32,9 °C	-	0,93	28 °C	30 m	-
4	34,6 °C	44,2 °C	40 °C	0,93	28 °C	30 m	0,26m ² /30,95
5	-	61,8 °C	-	0,94	28 °C	30 m	-

Aquest edifici està format per PB + 6 PP, amb 3 vivendes per planta, fent un total de 18 vivendes i un local comercial en PB. Els vidres són monolítics i els marcs de fusta, excepte en la planta baixa on la fusteria és d'alumini per on suposem que es produeixen pèrdues energètiques, però que no podem valorar correctament ja que no tenim les dades de temperatura interior de les diferents plantes de l'edifici. A l'any 2005 es va fer una rehabilitació de la façana principal. Cal destacar que existeixen quatre finestres que han estat substituïdes i per on no es produeixen pèrdues energètiques.

La línia 1 del termograma vol demostrar les diferents temperatures que existeixen en la façana, entre dues plantes de l'edifici. La disminució de temperatura correspon amb l'ornamentació de pedra natural de la façana (veure figura 2.76), la qual té més secció i al tractar-se d'un element independent no s'escalfa de la mateixa manera que la resta de la façana. Com podem observar els valors de temperatura del parament són molt elevats en comparació amb altres edificis analitzats degut a que durant la presa del termograma la radiació solar es trobava incidint en aquesta façana, el que provoca un sobreescalfament de la mateixa. Aquest fet s'ha de tenir present en la interpretació dels valors de temperatura obtinguts, ja que estan sobrevalorats. Tot i això ens interessa poder veure zones contrastades de temperatura, i en aquesta imatge es poden observar clarament.

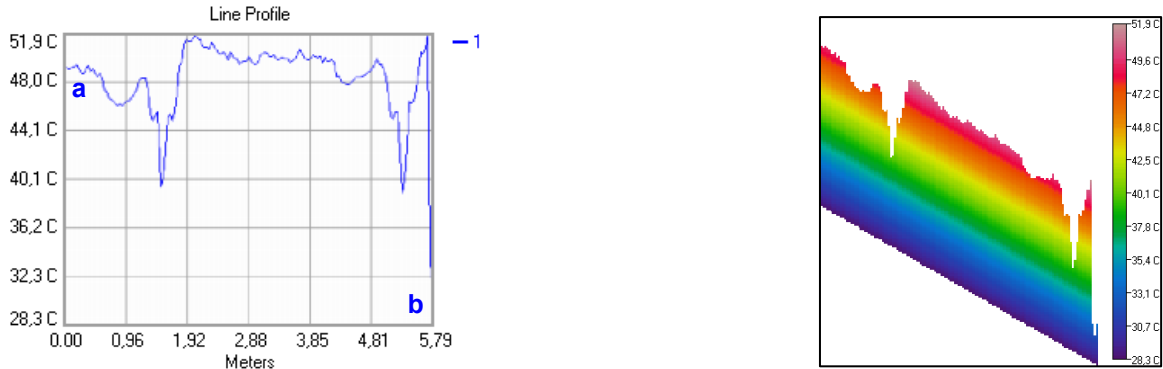


Figura 2.76: Gràfic línia 1 i perfil del comportament tèrmic línia 1 (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

El punt 2 ens mostra un descens de temperatura corresponent als brancals de les finestres. L'augment de la secció d'aquest element comporta que trigui més en escalfar-se. El punt 3 fa referència la part inferior del voladiu la qual es troba a menys temperatura que la resta de la façana ja que es tracta d'una zona ombrejada. En referència al punt 4, ens trobem amb un altre element ornamental que per la seva secció es demora més en escalfar-se. El punt 5 ens indica la fusteria de les finestres, les quals estan a temperatura molt elevada, i suposem que es produeixen ponts tèrmics ja que no tenen trencament de pont tèrmic, però no podem valorar ja que prescindim de la temperatura interior de la vivenda.

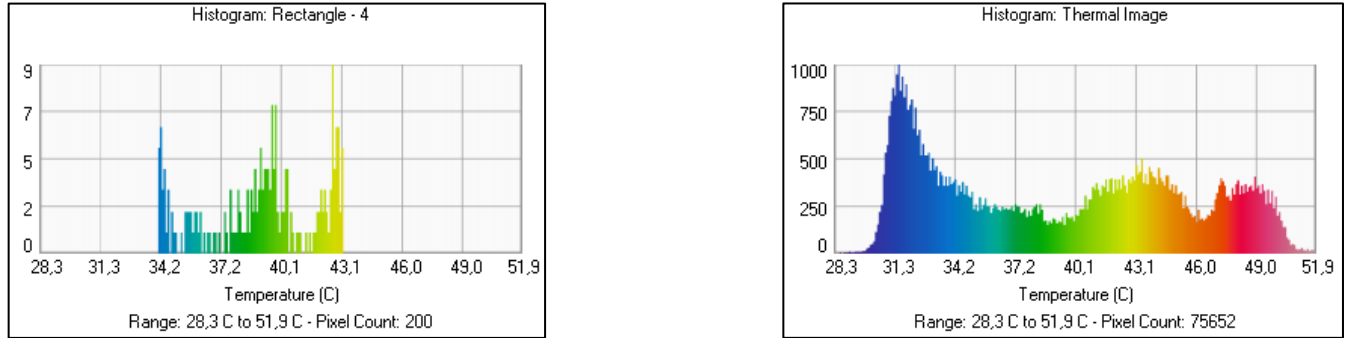
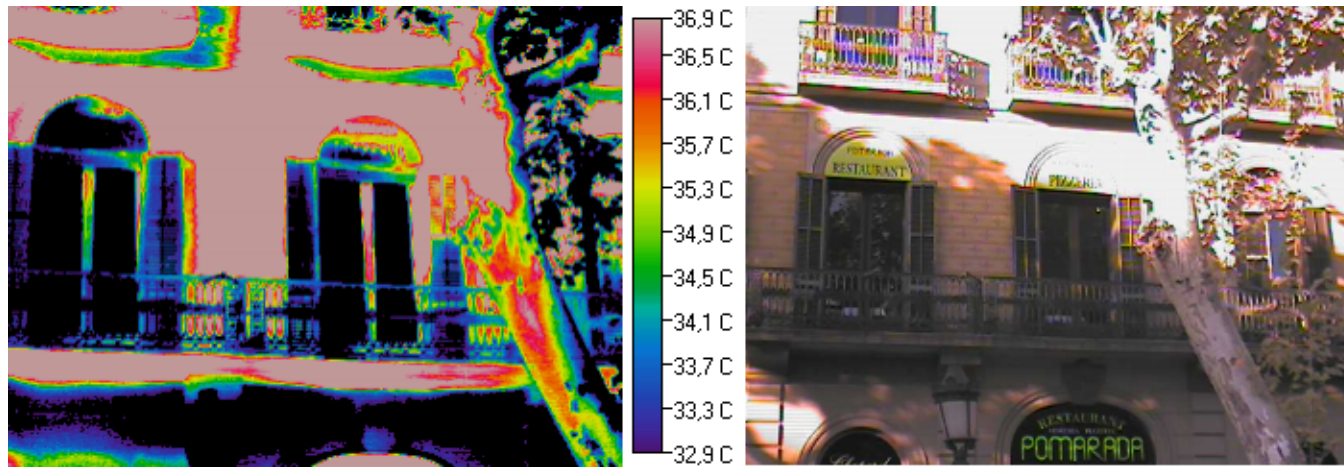


Figura 2.77: Histogrames de distribució del rectangle 4 i de la imatge infraroja (Font: Elaboració pròpia amb software Image Processor Pro II)

TERMOGRAMA 17:

- Ubicació:



A diferència del termograma 17, el qual s'ha pogut analitzar tenint present l'efecte de la radiació solar, s'ha volgut exposar el present termograma, on es pot observar que també existeix radiació solar directa i zona ombrejada. Tot i això en aquest cas, no podem extreure dades de temperatura, ja que degut a l'angle de la presa de la imatge en combinació amb els raigs solars, dificulten l'obtenció dels resultats fiables.

S'ha volgut exposar aquesta imatge, ja que en la part de la teoria de la Termografia s'ha explicat l'angle correcte de la presa d'un termograma i aquest és un exemple d'una incorrecta imatge termogràfica.

1.6.5 PROPOSTES D'ACTUACIÓ

En aquest apartat es treballen les possibles mesures d'actuació que es poden duu a terme per millorar el comportament eficient dels edificis d'aquesta mançana de l'Eixample. Com s'ha pogut observar vers l'anàlisi d'aquests immobles, no s'han pogut justificar els motius que ocasionen alguns punts calents i freds detectats, a excepció de dos característiques bàsiques que hem pogut visualitzar amb la càmera termogràfica, i posteriorment determinar el seu motiu i són: la irregularitat de temperatures en les superfícies de les façanes i els punts tèrmics per les obertures (vidres i fusteries). La resta de deficiències detectades, no s'han pogut estudiar detalladament i per tant especificar el seu origen per la dificultat d'accés a l'interior dels edificis. Per aquest motiu, no es proposen mesures d'actuació per aquests defectes.

Com ja sabem la solució constructiva de les façanes del 60 % dels edificis de la mançana estan solucionades amb construcció tradicional, sense càmera d'aire o aïllament tèrmic.

Amb els termogrames, hem pogut observar que existeixen irregularitats de temperatura en tot el parament d'aquests edificis, per aquest motiu la mesura aplicable és la col·locació d'aïllaments tèrmics orgànics o sintètics per evitar aquests punts tèrmics. Cal destacar que en els edificis de Construcció Tradicional no és possible l'ús de sistemes per l'exterior, ja que aquests modifiquen l'estètica de la façana i són edificis protegits ja que formen part del patrimoni històric de la ciutat. Al tractar-se de façanes sense cambra d'aire, la única solució és rehabilitar per l'interior de la vivenda, essent conscients de la reducció d'espai que comporta aquesta solució. En el projecte de "La unitat de mançana de l'Eixample" s'aprofundeix més sobre aquest tema, treballant amb les diferents solucions constructives per realitzar una correcta rehabilitació. També es creu convenient enfocar-nos en treballar en solucions específiques, com en el cas de les cornises o llosanes, on es pot augmentar el gruix de les mateixes a partir d'un element de les mateixes característiques (de manera que no modifiqui l'estètica de la façana), per evitar el pont tèrmic de manera més econòmica i fàcil.

La segona proposta d'actuació és la rehabilitació dels buits. Es proposa la substitució dels vidres monolítics d'una sola fulla, per vidres dobles amb càmera d'aire. En referència als marcs, hem pogut observar que la majoria d'edificis tenen marcs de fusta, els quals proporcionen alts nivells d'aïllament tèrmic, degut a la seva baixa conductivitat. Tot i això els valors de les transmittàncies depenen de la densitat de la fusta utilitzada, i per aquest motiu hem pogut observar punts tèrmics en algunes fusteries. Es proposa la col·locació de marcs de fusta per evitar trencar l'estètica de la façana, però que incorpori dos juntes d'estanquitat a la fulla i en el marc.

La tercera proposta d'actuació es centra en treballar amb les proteccions solars de les finestres. Com s'ha pogut observar en el moment de l'anàlisi in situ, la majoria de les finestres de la mançana tenen

lamelles de protecció solar de fusta, que per la seva morfologia no ajuden a aprofitar la llum natural per aconseguir l'estalvi energètic. També s'ha comprovat en els termogrames que aquests elements tenen temperatures molt elevades, ja que absorbeixen la calor i es converteixen en un element radiador que afecta a l'interior dels edificis. Per aquest motiu es proposa la col·locació d'elements de protecció solar col·locades el més exterior possible, o la col·locació de persianes de corda projectades cap a l'exterior per sobre de la barana del balcó.

1.6.6 CONCLUSIONS

El fet de no haver pogut accedir a l'interior de les vivendes particulars per poder obtenir totes les dades necessàries per realitzar un correcte anàlisi termogràfic, ha dificultat la interpretació de les imatges termogràfiques, ja que no s'ha pogut justificar el motiu de les diferències de temperatura (punts calents i freds).

No obstant amb la informació obtinguda pel projecte previ realitzat per altres companyes titulat "La unitat de la mançana de l'Eixample", s'han pogut corroborar dades que s'exposaven com fusteries sense trencament de pont tèrmic, vidres d'una sola fulla o façanes sense aïllament, per on es poden observar diferències de temperatures importants, però la manca de dades de temperatura interior de l'edifici han dificultat la correcta lectura de les imatges. És per aquest motiu, que s'ha evitat aprofundir en el tema ja que per poder realitzar un correcte estudi termogràfic tal i com exposa la Norma Europea EN 13187:1999 és necessari poder demostrar les justificacions que s'estan donant a partir de plànols o dades de temperatures, i estar 100% segur de que el motiu que estem donant en relació a aquesta diferència de temperatura és el correcte.

Tot i això, la realització d'aquest anàlisi termogràfic ha donat continuïtat al projecte de grau "La Unitat de la Mançana de l'Eixample" demostrant ser imprescindible, no només per aportar dades reals, a partir de les quals podem realitzar càlculs energètics que són necessaris en un informe i extreure conclusions, sinó, per ajudar a comprendre de forma visual, els problemes energètics que presenta l'edifici als seus usuaris.

Per finalitzar m'agradaria exposar que haver realitzat l'anàlisi termogràfic en aquesta època de l'any ha dificultat la interpretació dels resultats, per l'equilibri tèrmic interior i exterior que ens hem trobat en alguns edificis. Es recomana per tant, elaborar un segon informe realitzat a l'hivern (on existeix contrast tèrmic), per poder complementar algunes dades que probablement en aquest estudi han passat desapercebudes, però que no s'han pogut demostrar degut al límit de temps de realització del Projecte Final de Grau, que ha impedit la realització de l'anàlisi a l'Hivern.

(Inspecció i informe termogràfic de façanes segons les directrius de la Norma Europea EN 13187:1999)

1.7 CONCLUSIONS FINALS DEL CONJUNT EDIFICATORI ANALITZAT: COMPARACIÓ DELS RESULTATS OBTINGUTS

Un cop realitzat l'anàlisi termogràfic de les diferents façanes que composen la pell del conjunt edificatori de les distintes Escoles de Barcelona i dels immobles que composen la mançana de l'Eixample, s'han obtingut diferents conclusions.

Com s'ha pogut observar vers l'estudi pràctic, s'han anat detallant individualment les conclusions obtingudes de cada anàlisi termogràfic, independentment dels resultats obtinguts en els altres edificis analitzats. Tot i això, la idea d'haver escollit aquesta tipologia d'edificacions per realitzar aquest estudi pràctic, portava com a treball final la comparació dels resultats obtinguts dels edificis destinats al mateix ús i equivalents característiques (com és el cas de les Escoles), els quals es troben ubicats en la mateixa zona climàtica (Barcelona), i posteriorment fer una segona comparació de les dades obtingudes de les Escoles amb els edificis que conformen la Mançana de l'Eixample, els quals estan destinats a ús comercial, oficines o habitatges particulars.

Les conclusions que s'han obtingut d'aquest estudi són:

En relació amb les diferents façanes que conformen els edificis d'ús educatiu, podem concloure que en tots els paraments hem pogut observar pèrdues energètiques, degut a la seva antiguitat de construcció. Els fronts de forjats, pilars, ampits, llindes i caixes de persianes no aïllades són punts crítics a tenir presents en tots els edificis, ja que són zones per on es produeixen dissipacions energètiques de manera significativa. En general en tots els edificis també s'han pogut observar ponts tèrmics pels buits de façana, tant per la fusteria com pel vidre, per tractar-se de vidres senzills amb fusteria sense trencament de pont tèrmic. Cal destacar que de les Escoles que estan dotades d'elements de protecció solar s'han pogut observar resultats més eficients en relació a diferències de temperatura entre interior i exterior.

En referència al comportament de l'usuari, aquest ha de contribuir en major grau per ajudar a aconseguir un comportament eficient de l'edifici. Durant les inspeccions Termogràfiques de totes les Escoles, s'han pogut observar finestres obertes en aules on estava el sistema de calefacció en funcionament, o llums enceses en estàncies que no estaven ocupades. Aquesta situació genera un augment de la demanda, un increment del consum energètic, un cost energètic més elevat i finalment la propagació d'emissions de CO₂ a l'ambient, contribuint a l'escalfament global. La conscienciació de l'usuari, per tant, és un tema que s'ha de treballar constantment, ja que depèn d'ell mateix arribar a aconseguir valors d'eficiència energètica millors.

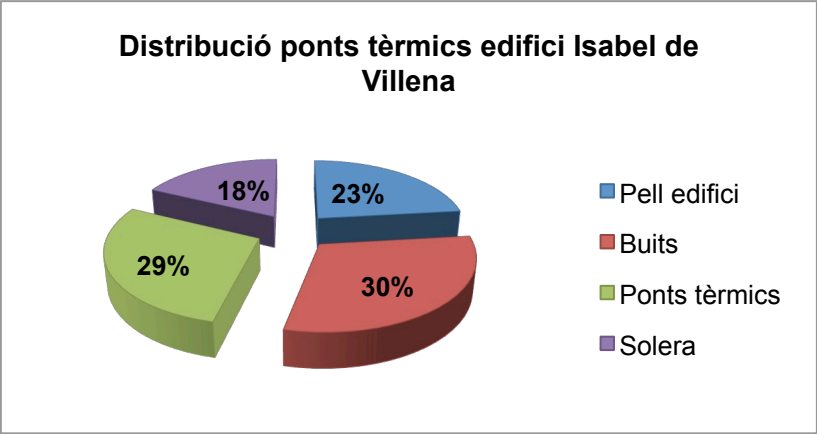
Del segon conjunt edificatori analitzat referent als edificis que composen la Mançana de l'Eixample, s'han pogut observar de forma general pèrdues energètiques per les fusteries i vidres de les finestres, i pels paraments de la majoria dels edificis de Construcció Tradicional (en especial per les llosanes dels balcons).

En general les dades obtingudes dels diferents conjunts edificatoris ens condueixen a determinar que els edificis de Construcció Tradicional de l'Eixample i totes les Escoles analitzades, pateixen pèrdues energètiques per la pell i els buits de l'edifici, independentment de les remunes realitzades, i l'ús del mateix, a causa de l'absència d'aïllament continu en tots els paraments, i el predomini de solucions constructives deficientes, associades amb l'època de construcció de l'immoble. Les remunes efectuades posteriorment a la construcció dels edificis, es van realitzar prèvies a l'aprovació del Codi Tècnic de l'Edificació (CTE), el qual es va aprovar a l'any 2006. Per aquest motiu no es poden exigir valors d'eficiència energètica elevats, ja que cap de les solucions esmentades compleix amb els requisits establerts al Codi Tècnic de l'Edificació. S'ha d'entendre, per tant, la situació actual de l'edifici, en funció de l'any de la seva construcció, i de l'any de la remunta realitzada, i proposar mesures d'actuació per millorar el comportament eficient d'aquests edificis a partir de la nova normativa i dels mètodes de mesura actuals, com els equips termogràfics. Opció la qual s'ha seguit en aquest Projecte.

Tot i això, cal destacar que en els edificis que s'han fet intervencions posteriors, com en el cas de l'Institut Narcís Monturiol a l'any 2004, la col·locació d'elements de protecció solar i de lamelles orientables ha contribuït des del punt de vista d'eficiència energètica de manera positiva. Tot i això, m'agradaria realitzar una comparativa amb la funció que realitzen els elements de protecció solars de les Escoles, els quals contribueixen en l'eficiència de l'edifici, amb les proteccions solars dels edificis de l'Eixample, les quals es converteixen en un element radiador de calor, i per la seva morfologia no deixen passar la llum natural. Cal tenir present que un element de protecció solar no sempre és una correcta solució si aquest no realitza la funció correcta, tal i com s'ha pogut observar en l'anàlisi termogràfic dels edificis de la mançana de l'Eixample.

Tot i haver treballat amb edificis de diferent ús i solucions constructives, hem pogut observar que majoritàriament totes les construccions tenen les mateixes deficiències degut al sistema constructiu utilitzat en funció de la seva època de construcció, la normativa del moment, i per la incorrecta solució constructiva dels punts crítics que també trobem diàriament en la construcció i/o d'un immoble.

A continuació s'exposa una gràfic orientatiu que resumeix les dades obtingudes de l'edifici escolar Isabel de Villena, el qual s'ha escollit com a exemple per poder visualitzar en forma de percentatges per on es produeixen més quantitat de pèrdues energètiques (ponts tèrmics), coincidint amb els resultats obtinguts amb la càmera termogràfica:



Gràfic 2.78: Percentatge de la distribució de punts tèrmics en l'edifici Isabel de Villena. (Font: Elaboració pròpia)

CÀLCUL DELS PERCENTATGES DE PUNTS TÈRMICS:

Ponts tèrmics lineals		
Nom	Y	F _{Rsi}
Façana en cantonada vertical entrant i sortint	0.13	0.77/ 0.90
Unió de solera amb paret exterior	0.10	0.76
Forjat entre pisos	0.16	0.81
Finestra de façana	0.17	0.75
Abreviatures utilitzades		
Y	Transmitància lineal (W/mK)	
F _{Rsi}	Factor de temperatura de la superfície interior	

Taula 2.79: Valors dels punts tèrmics obtinguts del càlcul dels elements constructius (Font: PFG Estudis previs d'un centre docent de 1960. Fundació escolar Isabel de Villena, Esplugues de Llobregat, David Gilbarte i Omar Ruben Marcos.)

Calculem el % de punts tèrmics en funció de la transmitància lineal de la taula (quantitat de calor que travessa un cos):

$$\Sigma = 0,13 \text{ W/mK} + 0,10 \text{ W/mK} + 0,16 \text{ W/mK} + 0,17 \text{ W/mK} = \mathbf{0,56 \text{ W/mK}}$$

- % pont tèrmic pell edifici = $\frac{0,13 \text{ W/mK}}{0,56 \text{ W/mK}} \cdot 100 = \mathbf{23,21 \%}$
- % pont tèrmic unió solera amb paret = $\frac{0,10 \text{ W/mK}}{0,56 \text{ W/mK}} \cdot 100 = \mathbf{17,86 \%}$
- % pont tèrmic forjat entre pisos = $\frac{0,16 \text{ W/mK}}{0,56 \text{ W/mK}} \cdot 100 = \mathbf{28,57 \%}$
- % pont tèrmic finestres = $\frac{0,17 \text{ W/mK}}{0,56 \text{ W/mK}} \cdot 100 = \mathbf{30,36 \%}$

En els edificis restants analitzats, la distribució de punts tèrmics segueix els mateixos criteris. S'ha comprovat que la majoria de pèrdues energètiques es produeixen pels buits de es finestres, seguint amb els punts tèrmics en cantells de forjats, brancals, llindes, etc. La pell de l'edifici és el tercer punt crític de l'edifici, finalitzant amb la unió entre la solar i la paret exterior, per on es produeixen menys pèrdues energètiques. Després de l'anàlisi termogràfic, podem comprovar que aquest gràfic tindria en termes generals la mateixa distribució percentual en tots els casos analitzats.

Un cop finalitzat aquest estudi dedicant un apartat a tractar tots els resultats obtinguts del conjunt edificatori, també cal citar dos aspectes importants que s'han viscut durant la realització del mateix. Concloem afirmant que durant la presa dels termogrames hem pogut ser protagonistes de diferents situacions incompatibles. La realització de l'anàlisi termogràfic a la primavera-estiu, es troba dificultat per la presència dels arbres, els quals provoquen ombra als edificis, i dels quals no podem obtenir els resultats desitjats. Això ha comportat que en alguns casos no poguéssim valorar la temperatura de la façana, en una situació on la temperatura ambiental exterior era alta per l'època de l'any, i la temperatura interior de l'edifici baixa per la presència d'aire condicionat, i de la qual es podien obtenir valors interessants. També cal emfatitzar sobre l'efecte de la radiació solar, la qual també ha dificultat en alguns casos la presa de les imatges, provocant reflexes i sobreescalfament de la superfície. Aquestes situacions s'hauran de tenir presents en tot anàlisi termogràfic a l'aire lliure.

ANNEX 2: PLANTILLA INFORME GENERADA AMB EL SOFTWARE

ANNEX 2

PLANTILLA INFORME GENERADA A AMB EL SOFTWARE

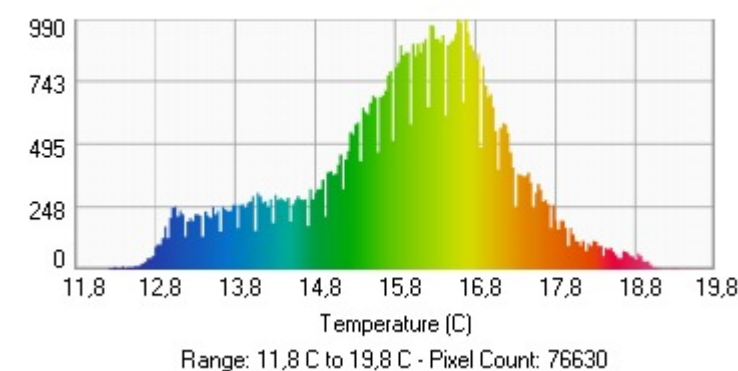
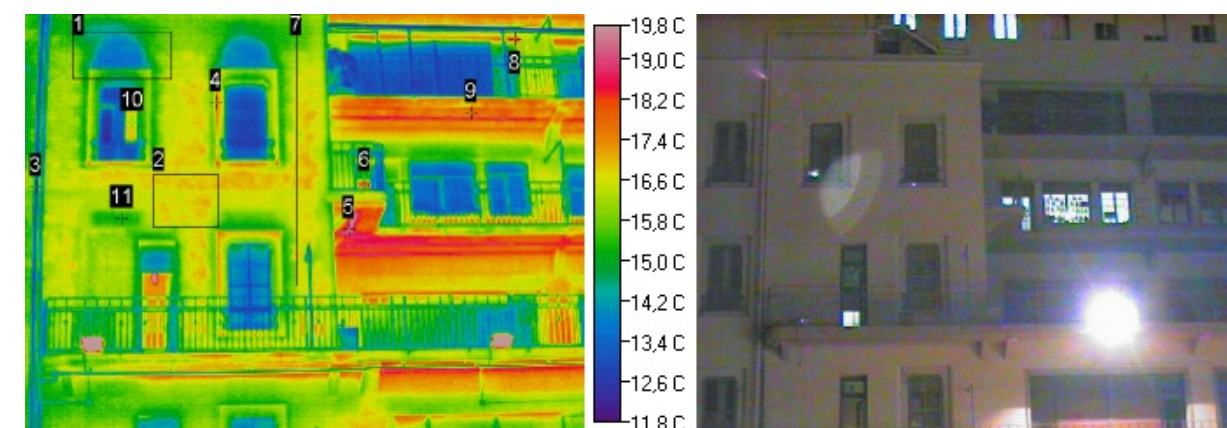
Contingut

- EN AQUEST ANNEX S'ADJUNTA UN EXEMPLE DE LA PLANTILLA QUE ET FACILITA EL SOFTWARE PER GENERAR UN INFORME SOBRE L'ESTUDI REALITZAT.

A continuació es presenta l'informe generat pel software d'anàlisi d'imatges termogràfiques. El programa t'ofereix l'opció d'omplir una plantilla general, la qual es pot personalitzar, i es tracta de l'informe que generalment les companyies encarregades de la realització de l'anàlisi termogràfic, presenten als seus clients. Per aquest motiu, s'ha cregut convenient exposar un exemple de la plantilla a partir d'un termograma realitzat en l'escola Lestonnac. En el cas de generar un informe complet a partir d'aquesta plantilla, s'haurien d'exposar tots els termogrames de l'edifici objecte d'estudi.

Inspection report Lestonnac

Image information	
File name	TH910015
Inspection time	19,20 h
Type	Thermal/Visible
Memo	No data



Date: 19/03/2012

Company name: Projecte Final de Grau

Operator: Patricia Sánchez

Point data

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temp. Max	16,9 °C	17,5 °C	13,1 °C	17,9 °C	19,8 °C	18,5 °C	17,3 °C	18,7 °C	17,9 °C	16,8 °C	15,1 °C
Temp. Min	13,3 °C	15,6 °C	-	-	-	-	15,6 °C	-	-	-	-
	15 °C	17 °C	-	-	-	-	17,3 °C	-	-	-	-
Emiss	0,93	0,93	0,79	0,93	0,93	-	0,93	0,93	0,93	-	0,93

Summary

Working condition:

Condicions ambientals durant l'anàlisi termogràfic de l'edifici:

- Cel ennuvolat
- Vent: 29 km/h
- Temperatura exterior: 14°C
- Humitat exterior: 71 %

Fault description:

En l'àrea 1 trobem una diferència de temperatura important de 3,6 °C. Existeix per tant, una distribució irregular de temperatura, i és deguda a que hi ha humitat retinguda en la part superior de les finestres (llinda). A l'àrea 2, i amb els raigs infrarojos es poden distingir els maons de l'obra de fàbrica que conformen el sistema constructiu de la façana, i la distribució irregular de temperatura per la manca d'aïllament. El punt 3 fa referència a tubs de gas de coure, per aquest motiu es troben a baixa temperatura. El punt 4 presenta un augment de temperatura a 17,9 °C. Entenem que es tracta d'un defecte constructiu, ja que coincideix amb el límit de l'entrant ornamental de la finestra de la planta quarta.

El punt 5 i 9 ens mostra un augment considerable de temperatura de 17,9 °C i 19,8 °C. Es tracten de les llosanes dels balcons, que tal i com he citat anteriorment, són una via de sortida d'aire interior. El punt 6 i 10, fan referència a una finestra oberta la qual deixa escapar aire interior, fet que disminueix el rendiment dels sistemes de calefacció. La línia 7 ens mostra la irregularitat de temperatures que existeix en la façana per la manca d'aïllament. El punt 8 fa referència a la caixa de persiana, per on es produeixen pèrdues de calor, per la manca d'aïllament o per una correcta col·locació del mateix.

Recommendation:

Per solucionar els problemes d'aïllament de les façanes, es suggereix la col·locació d'aïllament tèrmic, ja sigui sintètic o orgànic vers tot el parament. Per pal·liar les pèrdues energètiques de les obertures i dels vidres de la façana Nord i Nord-Est, les mesures aplicables seran la substitució dels elements per

fusteries d'alumini de baixa emissivitat Low-E i vidres amb doble càmera. Si no es vol trencar amb l'estètica de la façana, es pot optar per col·locar fusteria de fusta de major emissivitat com les de faig.

En referència a les caixes de persiana, comprovar que existeix aïllament tèrmic, i en cas afirmatiu, verificar si existeix desgast del mateix, o bàsicament no presenten aquesta prestació.

Implementació de proteccions solars en la façana Sud-Oest, que ajudin a regular els raigs Solars tant a l'hivern com a l'estiu.

Sectorització d'escales per evitar l'efecte xemeneia, o evitar tenir la calefacció en funcionament de les plantes superiors, per evitar la pujada de temperatura.

Realitzar un manteniment correctiu i preventiu constant.

ANNEX 3: FOTOGRAFIES DELS DIFERENTS EDIFICIS ANALITZATS

ANNEX 3

FOTOGRAFIES DELS DIFERENTS EDIFICIS ANALITZATS

Contingut

- FOTOGRAFIES COL·LEGI LESTONNAC
- FOTOGRAFÍES COL·LEGI DOCTOR FERRAN I CLÚA
- FOTOGRAFÍES FUNDACIÓ ESCOLAR ISABEL DE VILLENA
- FOTOGRAFÍES INSTITUT NARCÍS MONTURIOL
- FOTOGRAFÍES EDIFICIS MANÇANA DE L'EIXAMPLE: C/ VALÈNCIA, C/ PAU CLARIS, C/ MALLORCA I PASSEIG DE GRÀCIA

FOTOGRAFIES EDIFICIS ANALITZATS (EDIFICIS ESCOLARS I EDIFICIS DE DIFERENTS USOS DE LA MANÇANA DE L'EIXAMPLE):

En aquest Annex s'exposen imatges sobre les diferents edificacions analitzades, per poder mostrar més detalladament les diferents instal·lacions dels immobles:

- COL·LEGI LESTONNAC:



Figura 1: Façana Sud-Oest, pati interior Escola



Figura 2: Pista esportiva pati interior



Figura 3: Pati interior



Figura 4: Ampliació fusteria Façana Nord- Est



Figura 4: Pati interior, Edificis l'indant a l'Escola



Figura 5: Façana Sud-Oest, pati interior Escola



Figura 6: Pista esportiva situada en el primer nivell



Façana Principal Nord-Est, Carrer de Pau Claris

- COL·LEGI DOCTOR FERRAN I CLÚA:



Figura 1: Façana Sud, llindant amb pati exterior

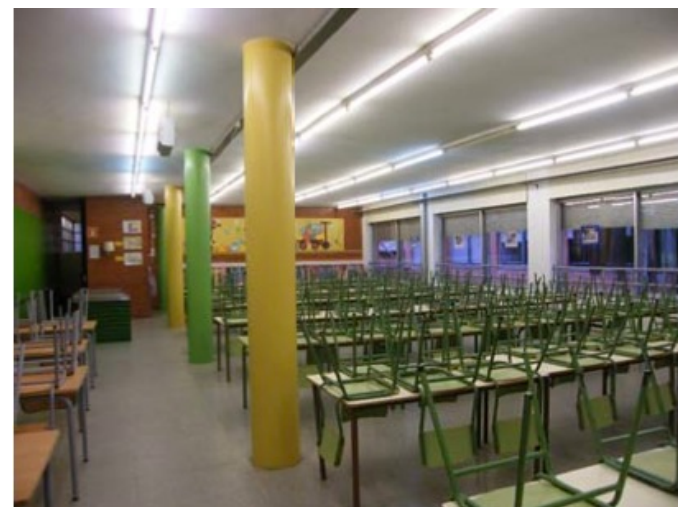


Figura 2: Zona interior, Sala Menjador



Figura 3: Façana Sud, zona superior



Figura 4: Persianes mallorquines amb lamel·les de protecció solar



Figura 5: Pista esportiva situada en la coberta de l'edifici



Figura 6: Façana Sud, zona central en desnivell de terreny



Figura 7: Façana Nord-Oest



Figura 8: Aula interior llindant amb façana Sud

- FUNDACIÓ ESCOLAR ISABEL DE VILLENA:



Figura 1: Façana Nord- Est, sortida a pati exterior



Figura 2: Façana Sud, tendals en Planta Baixa



Figura 3: Façana Nord- Est



Figura 4: Façana Nord-Est



Figura 5: Accés a la Planta Soterrani de l'Edifici pel pati exterior



Figura 6: Façana Principal Nord- Oest



Figura 7: Façana Nord- Oest

- INSTITUT NARCÍS MONTURIOL:



Figura 1: Façana Sud



Figura 2: Façana Nord, Entrada principal



Figura 3: Façana Oest, l'indant amb parc



Figura 4: Façana Est



Figura 5: Ampliació finestres i lamel·les Façana Oest



Figura 6: Façana Est



Figura 7: Façana Est



Façana Est, zona poliesportiva

- EDIFICIS QUE COMPOSEN LA MANÇANA DE L'EIXAMPLE LIMITADA PELS CARRERS: DE VALÈNCIA, PAU CLARIS, MALLORCA I PASSEIG DE GRÀCIA:



Figura 1: Edifici a Carrer València



Figura 2: Edifici a Carrer Pau Claris



Figura 3: Cantonada C/ Pau Claris amb C/ Mallorca



Figura 4: Edificis a Carrer València



Figura 5: Edifici a Carrer Mallorca



Figura 6: Edifici a Carrer Mallorca



Figura 7: Cantonada edifici C/ Mallorca amb Passeig de Gràcia



Figura 8: Edifici a Carrer Pau Claris



Figura 9: Edifici a Carrer Mallorca



Figura 10: Edifici a Passeig de Gràcia

ANNEX 4: TAULA EMISSIVITAT I PROPIETATS TÈRMiques DELS MATERIALS DE CONSTRUCCIÓ

ANNEX 4
TAULA EMISSIVITAT I PROPIETATS TÈRMiques DELS MATERIALS DE CONSTRUCCIÓ

Contingut

- 1. Taula Emissivitat
- 2. Taula Propietats Tèrmiques dels materials de construcció

1. TAULA D'EMISSIVITAT:

MATERIAL	TEMPERATURA	ε
Aluminio, bobinado	170 °C	0,04
Aluminio, no oxidado	25 °C	0,02
Aluminio, no oxidado	100 °C	0,03
Aluminio, muy oxidado	93 °C	0,20
Aluminio, muy pulido	100 °C	0,09
Algodón	20 °C	0,77
Hormigón	25 °C	0,93
Plomo, rugoso	40 °C	0,43
Plomo, oxidado	40 °C	0,43
Plomo, gris, oxidado	40 °C	0,28
Cromo	40 °C	0,08
Cromo, pulido	150 °C	0,06
Hielo, liso	0 °C	0,97
Hierro, esmerilado	20 °C	0,24
Hierro, decapado	100 °C	0,80
Hierro, laminado	20 °C	0,77
Yeso	20 °C	0,90
Cristal	90 °C	0,94
Granito	20 °C	0,45
Caucho, duro	23 °C	0,94
Caucho, blando, gris	23°C	0,89
Hierro fundido, oxidado	200 °C	0,64
Madera	70 °C	0,94
Corcho	20 °C	0,70
Radiador, negro, anodizado	50 °C	0,98
Cobre, deslustrado	20 °C	0,04
Cobre, oxidado	130 °C	0,76
Cobre, pulido	40 °C	0,03
Cobre, enrollado	40 °C	0,64
Plásticos: PE, PP, PVC	20 °C	0,94
Pintura, azul en lámina de aluminio	40 °C	0,78
Pintura, negra, mate	80 °C	0,97
Pintura, amarilla, 2 capas en lámina de aluminio	40 °C	0,79
Pintura, blanca	90 °C	0,95
Mármol, blanco	40 °C	0,95
Ladrillo	40 °C	0,93
Latón, oxidado	200 °C	0,61
Pinturas al óleo (cualquier color)	90 °C	0,92 a 0,96
Papel	20 °C	0,97
Porcelana	20 °C	0,92
Arenisca	40 °C	0,67
Acero, galvanizado	200 °C	0,52
Acero, oxidado	200 °C	0,79
Acero, estirado en frío	93 °C	0,75 a 0,85
Arcilla, cocida	70 °C	0,91
Pintura de transformador	70 °C	0,94
Ladrillo, mortero, cal	20 °C	0,93
Zinc, oxidado	-	0,1

2. TAULA PROPIETATS TÈRMQUES MATERIALS DE CONSTRUCCIÓ:

PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y AISLANTES				
Material	Densidad (kg/m³)	Calor específico (J/(kg·K))	Conductividad térmica (W/(m·K))	Difusividad térmica (m²/s) (x10 ⁻⁶)
Acero	7850	460	47-58	13,01-16,06
Agua	1000	4186	0,58	0,139
Aire	1,2	1000	0,026	21,67
Alpaca	8,72	398	29,1	8384,8
Aluminio	2700	909	209-232	85,16-94,53
Amianto	383-400	816	0,078-0,113	0,250-0,346
Arcilla refractaria	2000	879	0,46	0,261
Arena húmeda	1640	-	1,13	-
Arena seca	1400	795	0,33-0,58	0,296-0,521
Asfalto	2120	1700	0,74-0,76	0,205-0,211
Baldosas cerámicas	1750	-	0,81	-
Baquelita	1270	900	0,233	0,201
Bitumen asfáltico	1000	-	0,198	-
Bloques cerámicos	730	-	0,37	-
Bronce	8000	360	116-186	40,28-64,58
Carbón (antracita)	1370	1260	0,238	0,139
Cartón	-	-	0,14-0,35	-
Cemento (duro)	-	-	1,047	-
Cinc	7140	389	106-140	38,16-50,41
Cobre	8900	389	372-385	107,45-111,20
Corcho (expandido)	120	-	0,036	-
Corcho (tableros)	120	1880	0,042	0,186
Espuma de poliuretano	40	1674	0,029	0,433
Espuma de vidrio	100	-	0,047	-
Estaño	7400	251	64	34,46
Fibra de vidrio	220	795	0,035	0,200
Fundición	7500	-	55,8	-
Glicerina	1270	2430	0,29	0,094
Goma dura	1150	2009	0,163	0,070
Goma esponjosa	224	-	0,055	-
Granito	2750	837	3	1,303
Hierro	7870	473	72	19,34
Hormigón	2200	837	1,4	0,761
Hormigón de cascote	1600-1800	-	0,75-0,93	-
Láminas de fibra de madera	200	-	0,047	-
Ladrillo al cromo	3000	840	2,32	0,921
Ladrillo común	1800	840	0,8	0,529
Ladrillo de circonio	3600	-	2,44	-
Ladrillo de magnesita	2000	1130	2,68	1,186
Ladrillo de mampostería	1700	837	0,658	0,462
Ladrillo de sílice	1900	-	1,070	-

Material	Densidad (kg/m³)	Calor específico (J/(kg·K))	Conductividad térmica (W/(m·K))	Difusividad térmica (m²/s) (x10 ⁻⁶)
Lana de vidrio	100-200	670	0,036-0,040	0,537-0,299
Latón	8550	394	81-116	24,04-34,43
Linóleo	535	-	0,081	-
Litio	530	360	301,2	1578,61
Madera	840	1381	0,13	0,112
Madera de abedul	650	1884	0,142	0,116
Madera de alerce	650	1298	0,116	0,137
Madera de arce	750	1591	0,349	0,292
Madera de chopo	650	1340	0,152	0,175
Madera de fresno	750	1591	0,349	0,292
Madera de haya	800	1340	0,143	0,133
Madera de haya blanca	700	1340	0,143	0,152
Madera de pino	650	1298	0,163	0,193
Madera de pino blanco	550	1465	0,116	0,144
Madera de roble	850	2386	0,209	0,103
Mármol	2400	879	2,09	0,991
Mica	2900	-	0,523	-
Mortero de cal y cemento	1900	-	0,7	-
Mortero de cemento	2100	-	1,4	-
Mortero de vermiculita	300-650	-	0,14-0,26	-
Mortero de yeso	1000	-	0,76	-
Mortero para revoques	1800-2000	-	1,16	-
Níquel	8800	460	52,3	12,92
Oro	19330	130	308,2	122,65
Pizarra	2650	758	0,42	0,209
Placas de yeso	600-1200	-	0,29-0,58	-
Plata	10500	234	418	170,13
Plexiglás	1180	-	0,195	-
Plomo	11340	130	35	23,74
Poliestireno	1050	1200	0,157	0,125
Porcelana	2350	921	0,81	0,374
Serrín	215	-	0,071	-
Tierra de diatomeas	466	879	0,126	0,308
Tejas cerámicas	1650	-	0,76	-
Vermiculita expandida	100	837	0,07	0,836
Vermiculita suelta	150	837	0,08	0,637
Vidrio	2700	833	0,81	0,360
Yeso	1800	837	0,81	0,538

▪ **Densidad (ρ):** masa de material por unidad de volumen: $\rho = m / V$ (kg/m³).

▪ **Calor específico (C):** cantidad de energía necesaria para aumentar en 1 °C la temperatura de 1 kg de material. Indica la mayor o menor dificultad que presenta una sustancia para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. Los materiales que presenten un elevado calor específico serán buenos aislantes. Sus unidades del Sistema Internacional son J/(kg·K), aunque también se suele presentar como kcal/(kg·°C); siendo 1 cal = 4,184 J. Por otra parte, el producto de la densidad de un material por su calor específico ($\rho \cdot C$) caracteriza la inercia térmica de esa sustancia, siendo esta la capacidad de almacenamiento de energía.

▪ **Conductividad térmica (k):** capacidad de un material para transferir calor. La conducción térmica es el fenómeno por el cual el calor se transporta de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura dentro de un mismo material o entre diferentes cuerpos. Las unidades de conductividad térmica en el Sistema Internacional son W/(m·K), aunque también se expresa como kcal/(h·m·°C), siendo la equivalencia: 1 W/(m·K) = 0,86 kcal/(h·m·°C).

▪ **Difusividad térmica (α):** caracteriza la rapidez con la que varía la temperatura del material ante una solicitud térmica, por ejemplo, ante una variación brusca de temperatura en la superficie. Se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = k / (\rho \cdot C) \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

ANNEX 5

ARTICLES ELISABETTA ROSINA

Contingut

1. NEW IRT PROCEDURES FOR THE EVALUATION OF STONE'S WATER EXCHANGE CHARACTERISTICS IN BUILDING

2. IRT MONITORING IN PLANNED PRESERVATION OF BUILT CULTURAL HERITAGE

3. LOCALIZING HISTORICAL CLUES USING IRT AND PETROGRAPHIC ANALYSES AT VILLA MIRABELLO, MONZA (ITALY)*

4. KARST SOIL AND RISING DAMP IN SASSARI: GUIDE LINES FOR RESTORATION OF CANOPOLENO COMPLEX

5. EFFETTI DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE DELLA PAVIMENTAZIONE SUL DEGRADO DEI RIVESTIMENTI E SUL MICROCLIMA

6. DIAGNOSTICS FOR THE PRESERVATION PLANS OF DIFFUSED HISTORICAL HERITAGE

7. TEXTILE SHELTERS FOR ARCHAEOLOGICAL AREAS: A CHANGE IN THE PRESERVATION OF CULTURAL HERITAGE

8. SPERIMENTAZIONE DI TECNICHE ANALITICHE INTEGRATE PER LA DIAGNOSTICA FINALIZZATA ALLA CONSERVAZIONE PREVENTIVA

9. UN CICLO DEL CINQUECENTO O UN AMBIENTE DELL'OTTOCENTO? INDAGINI PROPEDEUTICHE AL RESTAURO DEL SALONE DI ULISSE NELLA PALAZZO DELLA PROVINCIA DI BERGAMO

10. INDAGINI SULLE PROBLEMATICHE CONSERVATIVE LEGATE ALL'UMIDITÀ

11. RESTAURI A RISCHIO: MICROCLIMA E DIFFERENZE SUPERFICIALI DEI MATERIALI IN OPERA

12. LA PREVENZIONE DEL DANNO E PRESTAZIONI DEI TRATTAMENTI CONSERVATIVI: METODI DIAGNOSTICI INNOVATIVI PER APPLICAZIONI IN SITU

13. "METODI DI ANALISI PRELIMINARE DEL DEGRADO PER I BENI CULTURALI"

14. "COMPATIBILITÀ E DURABILITÀ DEI RESTAURI DEGLI AFFRESCHI IN CONDIZIONI MICROCLIMATICHE SEVERE"

En aquest annex s'exposen 14 dels articles d'Elisabetta Rosina, dels quals s'han obtingut dades per elaborar el Projecte:

1. New IRT procedures for the evaluation of stone's water exchange characteristics in building

N. Ludwig¹, E. Rosina², A. Sansonetti³

¹ Università degli Studi di Milano, Dip. Di Fisica, nicola.ludwig@unimi.it

² Politecnico di Milano, Dip. BEST, elisabetta.rosina@polimi.it

³ ICVBC, CNR, a.sansonetti@icvbc.cnr.it

Abstract

The paper shows the application of two innovative IRT methods for measuring the diffusion of water on material surfaces. Laboratory tests on 30 specimens of marble, calcarenite and sandstone show a clear correlation between porosity, evaporation flux (drying index), capillarity and diffusion phenomena of water both in liquid and vapour phase inside the microstructure of the stone specimens. Results of these well known methods validated the data obtained by two innovative IRT techniques: the spilling of a drop of water on surface and the diffusion of a "moisture ring" around the damp surface after the contact with a soaked sponge. Time of spreading and the geometric shape of the damped area seem to depend on the porosity of the material.

Keywords: IRT, moisture diffusion, capillarity, stone, contact sponge, water exchange, cooling, evaporation, drying index

1. Introduction

Aim of the paper is to propose new methods of IR thermographic techniques for the evaluation of water exchange characteristics of stone materials.

IR analysis techniques and integrated test procedures to evaluate the thermo-hygrometrical behaviour of three different stones are presented.

The cycle of water exchange between air and masonry is mostly affected by the hygroscopicity properties of the surfaces, the micro-porosity distribution, hydrophilicity of the constitutive minerals. Water enters a porous material either as a liquid or vapour; as a liquid, it dissolves and transports salts; as a vapour, it is retained through hygroscopicity.

Two types of condensation may be distinguished: as a first step a microcondensation (or capillarity condensation) in pores, then a surface condensation, which forms a liquid uniform film over the surface. The transition point between these two mechanisms defines the critical moisture content of a porous material. The critical moisture content is constant for each material, at the same environmental condition and state of conservation, and depend mainly on total open porosity and pore-size distribution.

The maximum of moisture content resulting from wet-dry cycling is closer to the surface in more compact stones, and deeper and broader in porous materials.

Therefore the damage strictly depends on the stone characteristics, especially as regards the surface and the layers few centimetres inside. In scientific literature the deterioration of porous materials is extensively discussed [1-5]. Prolonged and extensive researches on local stones characteristics, allowed the researchers to classify materials of historic buildings according to their durability [6, 7]. This line of research seems to carefully respond to the requirements of restorers and professionals in charge for the safeguard of cultural heritage.

In previous papers [8, 9] the authors analysed the differences of hygroscopic performances of plaster surfaces due to the roughness and compactness of finishing. In this paper the authors focus on the affection of the characteristics of three different stone on the water exchange, and especially their porosity, capillarity and drying index. Scope of the research is to analyse the behaviour of the very exterior layer of the material, and with this aim authors integrated steady techniques with the temperature measures, obtained by two techniques of passive IRT. The study of the exterior layer of the material is crucial to evaluate the effects of damage, due to the water

exchange, and the change of the surface hygroscopic characteristics due to the application of restoration products (strengthening, protective). Rules in force [10-13] and most advanced testing procedures in UE [14] indicate the porosity, capillarity, drying index for the material characterization: their measurements are obtained with weighing tests (the two latter) and the average absorption of the whole thickness of the specimens. Main scope of this research is to set up measure techniques which can be applied in the field, directly on the building materials, with the aim to directly survey the thermal-hygrometric behaviour of the very exterior layers (less than 1 cm). Both the presented methods analyse the evaporation of a small quantity of water applied on the surface. The first method uses the application of water without any pressure (free spilling of a drop on the plane surface of the specimen). In the second one the application of water is performed by means of a damped sponge applied with controlled pressure [15, 16]. In both cases the researchers observe the spreading of water on the surface and inside the stone. The results of laboratory test on three stones (ten specimens for each kind of stone) show a clear correlation between porosity, evaporation flux (drying index), capillarity and spreading phenomena of water and vapour inside the microstructure of the external layer of the material.

The use of a IR camera sensitive in Shortwave range allows to obtain other information regarding the water presence in the specimen surfaces.

In fact liquid water has a strong absorption band at 1.9 mm. The comparison of this images with the ones recaptured in the Longwave range helps to distinguish between the heat diffusion (caused by evaporation) and water spreading.

2. Materials: Specimens characteristics

Three different kind of natural stones have been chosen with different physical features respect to water absorption. Specimen sized 5x5x2 cm have been used.

Noto Calcarenite: is a porous yellowish fossil-bearing Miocene calcarenite quarried in Sicily. Its micro-structure is well known and described in literature. This calcarenite is characterized by a high porosity (36%) made of a large quantity of macropores¹; the pore diameter is prevalently (about 70%) around 1-5 mm. This characteristic gives the stone a high capillarity absorption rate. This variety probably contains ink bottle section pores, because the intrusion/extrusion curves showed that the absorbed mercury is retained inside the materials.

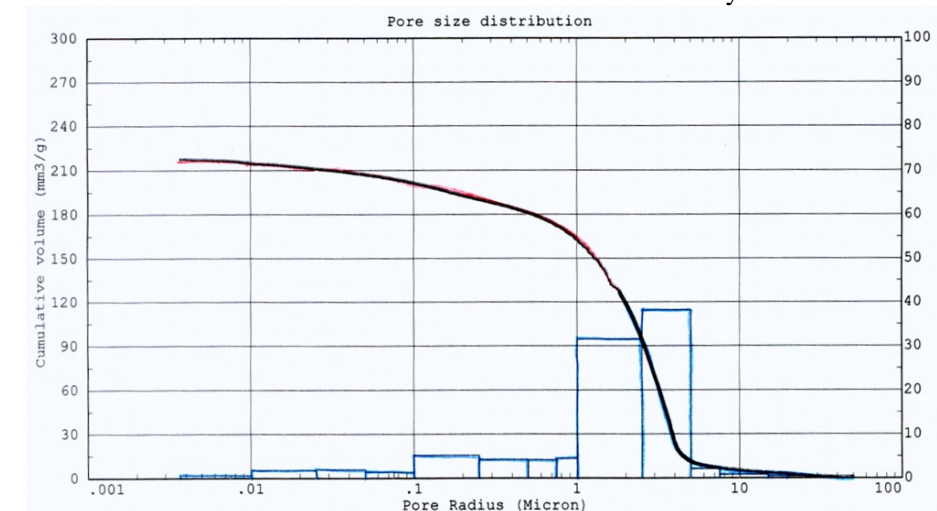


Fig. 1, porosity distribution and size curve of Noto calcarenite

Dorata Sandstone (Arenaria di Manciano): is a medium porosity Miocene sandstone quarried in South-Tuscany with sparry calcitic cement and feldspar-quartz clasts. Carbonate content is quite high, reaching 67% at the maximum. This sandstone is characterized by a medium porosity (10%) made up of meso and macropores; the pore diameter is spread between 0.01-5 mm. This characteristic gives a high capillary absorption rate also to this stone. This variety probably contains ink bottle section too, because the porosimeter curves showed that the absorbed mercury is retained inside the materials.

¹ Riccardo Negrotti, Politecnico di Milano, performed the porosity tests in June 2009 (by a volume porosimeter). The authors thank him for the helpful collaboration.

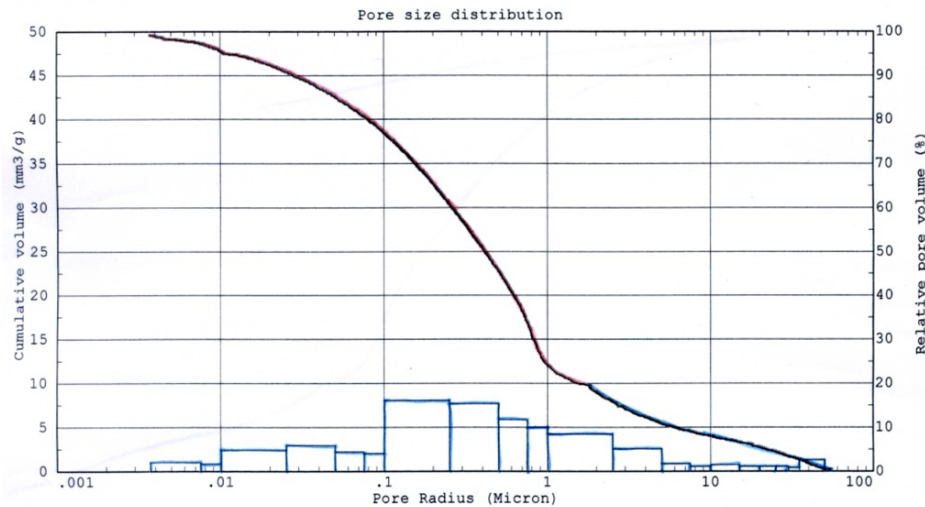


Fig. 2, porosity distribution and size curve of Dorata sandstone

Marble: a dolomitic Marble from Yugoslav Macedonia with a dolomite content over 99% with a saccaroid structure has been used. Total porosity varies from 1.5 to 2.5%. The marble is characterized by a very low total open porosity (0.5%) made up of macropores; the pore diameter is prevalently (about 70%) around 1-7.5 mm. This characteristic gives the stone a very poor capillarity absorption rate.

3. Tests of physical properties of the exterior layer of stone.

Contact sponge test

The test provides quantitative measurements of water absorbed through a surface by pressing a small (3 cm diameter) soaked sponge on the surface. The procedure was devised by the research groups of P. Tiano at CNR-ICVBC in Florence, and it was used to evaluate the differences of liquid water sorption on samples after the application of restoration products [15-16]. The test was modified for the present research. Contact time was reduced to 2 minutes and samples were kept on a horizontal plan. The amount of water used in each test was c.ca 1.5 ml.

Drying index and measures of evaporation flux

The test consists of weighing the sample during evaporation from saturation condition up to equilibrium with dry air (RH 40%, T°C = 20°C) in order to obtain the drying curve [17]. In this way water/vapour exchange between the sample surface and the air was measured. Authors modified the procedures acquiring data at higher rate of recapturing (1 minute), in order to obtain the flux evaporation curve by applying derivative to the weight curve in time. Evaporation flux measures per surface unity allow to obtain the quantitative evaluation of the differences due to the samples microstructure characteristics. Measure of absorption by capillarity. The test consist of

Stone	Q _f (mg/cm²)	CA (mg/cm²s ^{1/2})
Marble	8,5130	0,1147
Dorata Sandstone	141,7688	0,7520
Noto Calcarenite	524,1614	10,6541

weighing specimens during water absorption by capillarity using the procedure described in UNI 10859; weight has been measured after 10', 20', 30', 1h, 2h, 4h, 24h, 48h, 72h.

Thermographic methods

Water drops test

The test permits to measure the surface characteristic of absorption and diffusion of liquid water by recapturing a IRT

video sequence, at optimal ambient condition (Air temperature = 23.5°±1° C, RH = 30±4 %). Passive recapture by IRT, at a rate of 1 Hz, results in a 10 minutes long sequence. During the recapturing, one drop of distillate water (0.03 ml) is placed on the sample surface. The sequence shows the water spreading on the surface according to porosity of the surface.

Moisture ring test

The contact sponge test was monitored by IRT. A continuous video recaptured 10 minutes of evaporation starting at the end of the sponge application. The procedure permits the researchers to observe the differences in water spreading on the surface. In both tests, evaporation of water causes cooling of wet areas, and due to the cooling the thermal contrast between wet and dry areas is higher when the evaporation flux is higher [18].

Optical test

The authors used a IR Camera (Jade Camera Cedip, sensitive in the peak of maximum absorption of liquid water at 1.934 mm) in order to distinguish between heat diffusion (cooling) and water spreading on the surface specimens. The recapture procedure is the same that was used for thermal tests [19].

4. Results

All tests permit to distinguish between surfaces of different materials because of their water exchange properties. In addition, they verify that the very exterior layer of materials surface really affects water absorption, spreading, evaporation mechanisms between ambient and surface.

Contact sponge test

Repetition of the quantitative evaluation of adsorbed water showed that the test is precise and accurate: water absorption ranges between 1.21 g (Noto) 0.078 g (Dorata) and 0.017 g (marble) with standard deviations expressed in percentage respectively of 18.8%, 17.7% and 17.6%. Differences in surface microstructure could cause these variation of water absorption results.

Measures of evaporation flux

Different evaporation phases can be distinguished on the three materials. Noto calcarenite displays values of evaporation flux higher than marble and Dorata sandstone, and specimen values are constant with a water content up to circa 10% (Fig. 3).

Evaporation flux on marble specimens resulted almost null.

Dorata sandstone shows an intermediate behaviour: it has an initial high value of flux in which most of the water content evaporates. Consequently, in a further step of the process, the evaporation flux value becomes similar to the marble one.

Measure of absorption by capillarity

Water absorption by capillarity gives the curves showed in Fig. 4, where Q_f is the water amount absorbed at 72h for surface unit; CA stands for angular coefficient of capillary absorption curve; it is calculated by means of CA = Q₃₀/√t₃₀ where Q₃₀ is the water absorbed by the specimen at 30 min for unit surface. Noto calcarenite reaches asymptote quite immediately after only 30 minutes, while Dorata sandstone takes more or less 8 hours to reach the asymptote.

Materials	Average area of the drop, starting point (px)	Average area of the drop, maximum extension (px)	Percentage of area's increase
Marble	14,98	17,41	16%
Noto Calcarenite	47,17	60,57	28%
Dorata Sandstone	16,04	37,99	137%

Table 1, table of the water absorption by capillarity

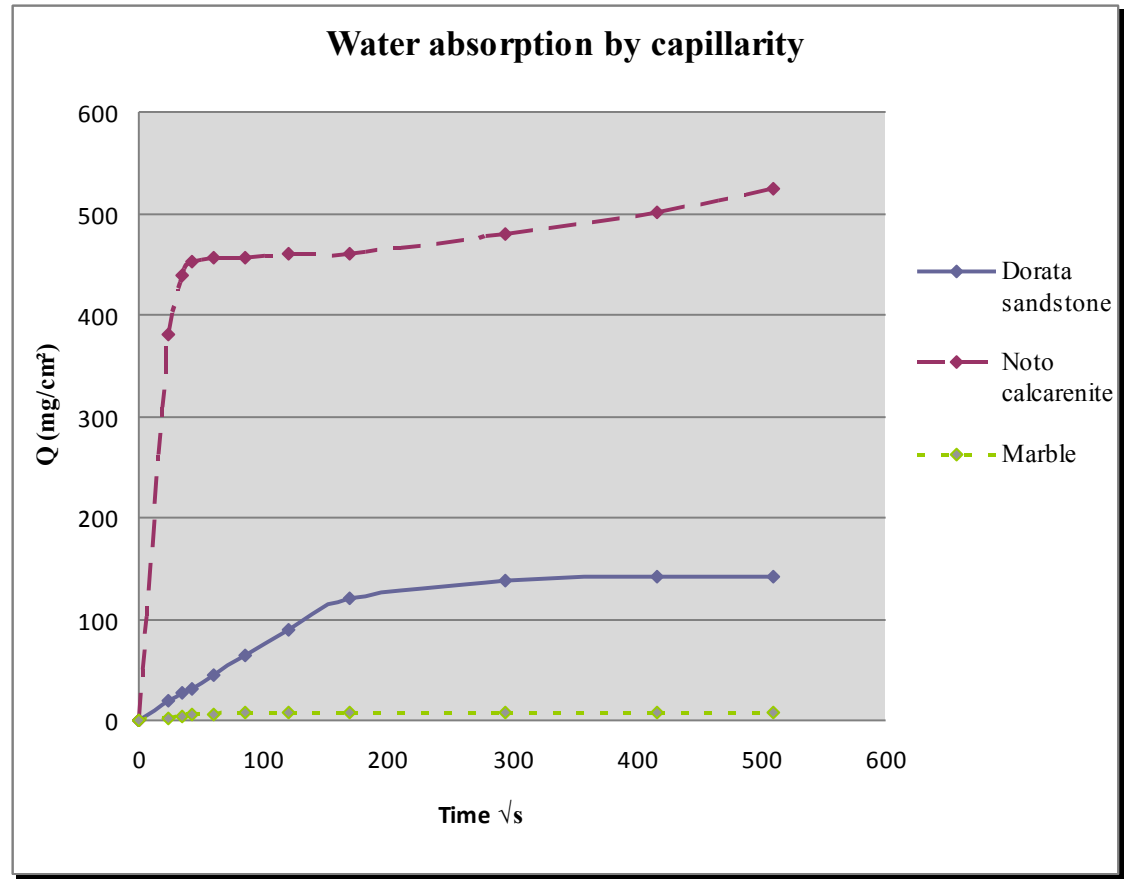


Fig. 4, graphic of water absorption by capillarity Dorata sandstone, Noto calcarenite, marble

Thermographic tests

Water drops tests

The differences of water propagation into the dry samples are shown clearly in fig. 5.

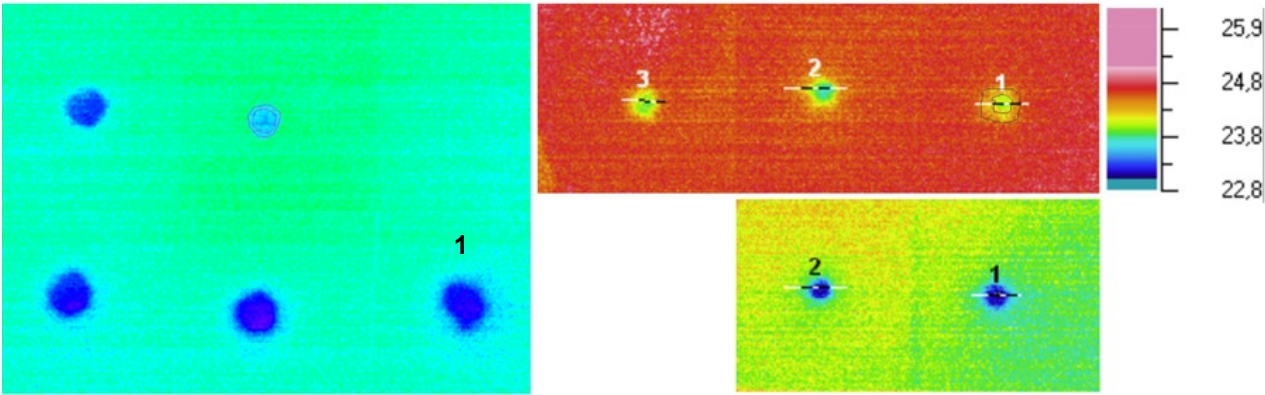


Fig. 5, final thermograms shot 10 minutes after the dropping of the first water drop on the surface (n 1 in each thermogram). Range of temperature 22.8-25°C, emissivity ranging between 0.89 and 0.95. From left to right clockwise: Noto calcarenite, Dorata sandstone, Marble

Table 2, table of the average areas of the drops after their placing on the surface and at their maximum spreading; water content of the drops is the same (0.03 ml)

Geometry of the drops immediately after the dropping and during the following spreading is quite different. On the surface of stone marble the wet zone is small, it has a regular circular shape, and the halo (due to water spreading or cooling effect) is limited to a thin contour around the drop. On the Noto calcarenite the wet area is more extensive than in the surface of marble, and it has a regular shape. On the Dorata sandstone the wet area is the widest, the shape is irregular and the halo is so spread that it is difficult to measure it.

Moisture ring test

After wetting the surfaces using contact sponges, the dynamic measure of temperature permits to obtain the evaluation of the extension of water diffusion on the surface. The extension and shape of wet moisture ring change for each surface depending on characteristics of materials. The authors selected the thermograms of the highest extension of area and perimeter to evaluate their differences in the three materials.

Materials	Moisture Ring Area (px)	Moisture ring Perimeter (px)
Marble	1083	118
Noto calcarenite	1274	127
Dorata Sandstone	991	113

Table 3, Measures of the moisture ring areas and perimeter, average on ten samples

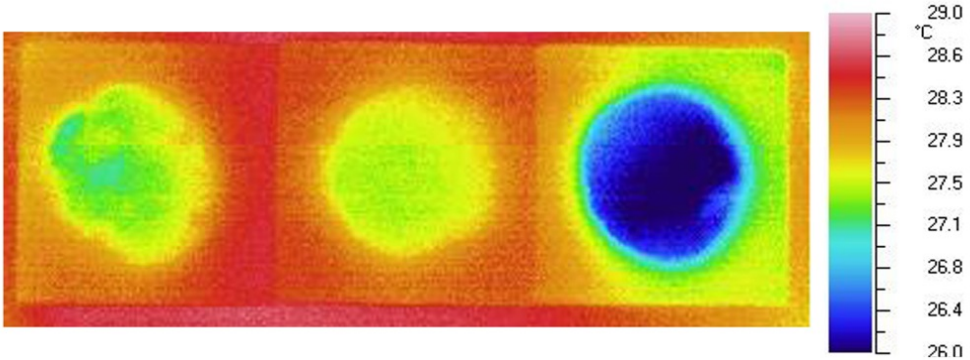


Fig. 6, Moisture ring after the contact between the soaked sponge, from left to right Marble, Dorata sandstone, and Noto calcarenite

Optical Test

Recaptures at 1.94 mm (fig. 7) show the distribution of absorbed liquid water after the contact with the soaked sponge. Marble image shows little drops of water but no effects of absorption. On the contrary both the thermograms shot on Dorata sand stone and Noto calcarenite show water absorption in the contact area with the sponge. On Dorata sandstone's image the countour of the wet area is less neat than on Noto calcarenite surface, because of the major water spreading on Dorata surface. Viceversa, on calcarenite surface the countour of wet area is regular, the size is almost the same size of the sponge contact surface, because of the fast and deep absorption of water in the stone surface.

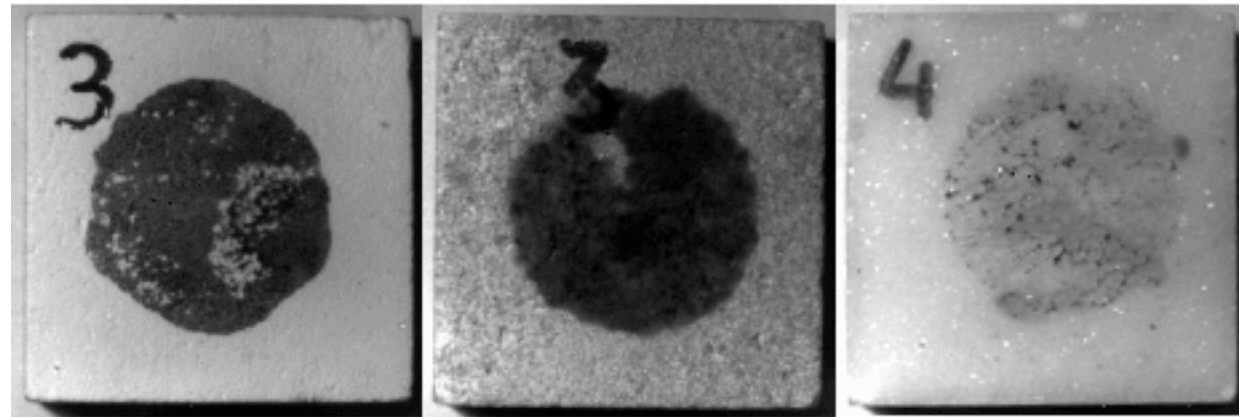


Fig. 7, images of Noto calcarenite, Dorata sandstone, marble (from the left) after the application of contact sponge, recapture in the near infrared band

Discussion of results

On marble surface the wet area is the same of the sponge moisture ring and the edges are irregular with a thin cooled ring, and the thermograms of the moisture ring allow to visualize the effects of low absorption. Which is typical of low porosity materials.

On surface of Noto calcarenite the wet area appears the widest because of the high cooling of the ring with regular shape. The thermograms of moisture ring allow to visualize the effects of high absorption causing both water spreading and consequently heat diffusion (due to the high evaporation).

In Dorata sandstone, cooling effect (drop and ring tests) is the smallest among all specimens, and the shape contour is totally irregular. The two experiments test the difference of water exchange behaviours: drops extensively spread, nevertheless liquid water of sponge has low spreading and optical test confirmed this hypothesis.

Considering that the absorbed water quantities on marble and Dorata sandstone are similar, it seems that the tests of moisture ring and water drop allow to distinguish between the different kinds of porosity: in fact Dorata sandstone has a major variety of pore sizes than marble and Noto calcarenite.

6. Conclusions

The presented techniques allow to measure different characteristics of the exterior layer of stone building materials. The presented procedures belong to three different fields of investigation, and it was showed their integrability by means of the results congruence. Thermographic procedures are innovative, and their validity was shown by data crossing with standardized procedures. In particular laboratory weighing tests produced validation data for thermographic results, and they resulted the most suitable tests to quantitatively evaluate the absorption capability and evaporation of liquid water.

In the research IRT by passive approach showed good results for the evaluation of the variation of surface microstructure by measuring the changes of the surface temperatures due to absorption, diffusion and evaporation of water.

Particularly, the integration of IRT and test of water absorption by contact sponge allowed to point out the factors which could have a major role for the identification of risk conditions, like the porous distribution and size in the very exterior layer of the materials, where the water exchanges occur much more frequently than few cm inside.

Researchers qualitatively showed the sensitivity of the presented methods in distinguishing the different porosity of materials. The further steps of the research will be the application of the water drop and moisture ring methods to stones before and after the application of water repellent restoration products, for evaluating the changes of liquid water absorption. After this second phase in the laboratory, the moisture ring test will be applied in the field tests, on stone materials under restoration.

The contact sponge test dates back to 2003, and at the present moment the test is under the evaluation of the working group UNI Cultural Heritage for the standardization of the method. The improvement of the test procedure will bring advantage also to the moisture ring test, especially for spreading and validate the

measurement of water absorption by contact sponge in the field: a steady procedure for wetting the surface will eliminate the existing incertitude in the evaluation of thermographic sequence recaptured during evaporation.

7. References

- [1] D. Camuffo, microclimate for cultural heritage, Electa Mondadori ed., Milano 2007
- [2] S.J. Gregg, K. S. W. Sing, Adsorption, surface area and porosity, 2 ed, Academic Press, London 1982
- [3] Roels, G., Carmeliet, J., Hens, H., Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone - (Part 1. A mesoscopic approach), in "Transport in porous media", 52(3), 333-350., Roels, G., Carmeliet, J., Hens, H., Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone - (Part 2. Macroscopic simulations), in Transport in porous media, 52(3), 351-369
- [4] N.S. Baer, R. Snethlage, saving our architectural heritage, The conservation of Historic Stones Structures, John Wiley&Sons, 1996
- [5] R. Cataldo, A. De Donno, G. De Nuzio, G. Leucci, L. Nuzzo, S. Siviero, Integrated methods for analysis of deterioration of cultural heritage: the Crypt of "cattedrale di Otranto", Journal of Cultural Heritage, 6 (2005), pag. 29-38
- [6] L. Carta, D. Calcaterra, P. Cappelletti, A. Langella, M. de'Gennaro, The stone materials in historical architecture of the ancient center of Sassari: distribution and state of conservation, Journal of Cultural Heritage, 6, 2005, pag. 277, 286
- [7] M. De' Gennaro, D. Calcaterra, P. Cappelletti, A. Langella, V. Morra, Building stones and related weathering in the architecture of the ancient city centre of Naples, Journal of Cultural Heritage, 1, 2000, pag. 399-414
- [8] N. Ludwig, E. Rosina, Restoration mortars at IRT: optical and hygroscopic properties of surfaces, proceedings of 8th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, June 2006, CNR-ITC ed, Padova 2006 (Italy)
- [9] E. Rosina, N. Ludwig, S. Della Torre, S. D'Ascola, C. Sotgia, P. Cornale, Thermal and hygroscopic characteristics of restored plasters with different surface textures, in Materials Evaluation, Vol. 66, n 12, Columbus OH (USA), 1271-1278
- [10] EN 1015-19 (1998: Methods of test for mortar for masonry: determination of water vapour of hardened rendering and plastering mortars);
- [11] EN 1015-18 (2004: Methods of test for mortar for masonry: water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar);
- [12] ASTM E96 Procedure A and B Dry Cup test;
- [13] UNI 10859 (Materiali Lapidei Naturali ed Artificiali. Determinazione dell'Assorbimento d'Acqua per capillarità) 2000 - Milan., Italy.
- [14] Hamstad: WP1, Moisture transfer properties and materials characterization, final report, February 2003
- [15] C.Pardini, P.Tiano, Valutazione in situ dei trattamenti protettivi per il materiale lapideo. Proposta di una nuova semplice metodologia, in Arkos 4/03, Nardini ed. Firenze 2003 (Italy), 32-38
- [16] D.Vandevor, M. Pamplona, O. Schalm, Y. Vanhellemont, V. Cnudde, E. Verhaeven, Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption, Journal of Cultural Heritage, Volume 10, Issue 1, January-March 2009, Pages 41-47
- [17] Misura dell'indice di asciugamento (Drying Index) Normal 29/88, NORMAL F metodologie fisiche meccaniche
- [18] E. Rosina, N. Ludwig, *Optimal thermographic procedures for moisture analysis in buildings materials*, Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications 1999, Munich, Germania, SPIE proceedings vol. 3827, ISSN 0277-786x, ISBN 0-8194-3313-6, SPIE ed. WA (USA), pp. 22-33
- [19] H. Wiggenshauser, Active IR in civil engineering, Infrared Physics&Technology, n 43, 2002, pag. 233-238, Elsevier ed.

Acknowledgements

Authors want to heartily thank the collaborators and assistants to the laboratory tests and processing data phases: dott. Marco Gargano, Marco Gondola, Federica Gerenzano, Shuly Anenburg, Eva Pathe

Closing Date for Submission: May 1st, 2004

2004 Scientific Programme Chair: Jean F. Bussière

2. IRT MONITORING IN PLANNED PRESERVATION OF BUILT CULTURAL HERITAGE

E. Rosina¹, N.P. Avdelidis², A. Moropoulou³, S. Della Torre⁴, V. Pracchi⁴, G. Suardi⁵

¹ Politecnico di Milano, DCSA, Milano, Italy; ² IRT & Materials Consultancy, Volos, Greece; ³ National Technical University of Athens, Athens, Greece; ⁴ Politecnico di Milano, BEST, Milano, Italy; ⁵ Restorer, V. Delle Fontane 2, Bianzano (BG), Italy.

Abstract: The aim of this research is to develop IRT (infrared thermography) procedures for the monitoring of restoration interventions on ancient building surfaces (i.e. application of protective films, water repellent, restoration of plaster delamination), the surveillance of the risks areas (i.e. risk for dew, infiltration, thermal bridges, window frames). The possibility to include IRT among the monitoring techniques for the planned conservation depends on the reliability of the procedures in the field and its low costs. In such cases, the tests can be repeated in time and can be applied on the highest number of buildings, according to the philosophy of the planned conservation. The goal is to find the parameters of feasibility and effectiveness of the in situ IRT tests throughout the in field experience of a study case. S. Maria presso S. Paolo church, serves as study case. It is a 15th Century building, settled in Cantù; the interior is frescoed and its decorated plasters have been recently under restoration. During the preliminary tests (passive and active IRT, psycrometry and climate monitoring, water content measurements on the surface and inside the masonry), a localised infiltration, causing a local damage, was found at the bottom of the masonry. At the end of the analysis, the condensation, which is distributed at any highness from the floor and that was responsible for most of the frescoes damage, was also realised as the main cause of damage. In fact, the church is seldom used and the restoration did not include the addition of a heating plant. Because it is not convenient to sharply change the microclimatic conditions for the best preservation of fresco, the preservation plan had to include temperature monitoring of the risk surfaces and control how the frescoes permeability could change due to the application of restoration products in the years after the intervention.

Introduction: The localisation of the areas where thermal gradients occur is an important issue for the early detection of damage: the colder zones can be responsible for thermal bridges (at risk of condensation in case of high RH values), and/or anomalous water content. In case of ambient conditions out of control, without a HVAC (Heating Ventilation Air Conditioning) plant, monitoring the surface

temperature can be a way to assess the real humidity condition of the wall surface [1, 2].

The test can be periodically repeated with a passive approach, and/or different active techniques, but in all cases without any damage for the wall. The repetition of the test allows finding out the variations of surface temperature, which is due to any unbalance between the masonry and the environment (or the microclimate); it constitutes an early alert for the damage that will occur in case the ambient conditions do not change. In fact, the control of ambient parameters is the way to prevent damage due to condensation and, generally speaking, the exchanges between surface and microclimate [3].

IRT has a prominent role among the diagnostic tools in planning preservation, to control the critical points in the structures (hydric plants, openings frames, chains/metallic elements and masonry) where leakage or thermal unbalance can occur and determine the beginning of damage. Most of all, in case of heating plants, IRT is effective to verify the real heating distribution on the surfaces [4], i.e. in the case of frescoes. The aim of the paper is to find the parameters of feasibility and effectiveness of the in situ tests. The study case of S. Maria presso S. Paolo properly serves to show the uses of IRT, because it is a typical 15th century small building, scarcely used, without a HVAC plant, with two sides free (on the roads) and two sides within the built fabric. Moreover, there is the first necessity to find out a convenient plan of the maintenance diagnosis because of the low possibility of fund rising and the high costs of the emergency intervention on the frescoes.

Experimental: A study case: Santa Maria presso San Paolo in Cantù.

The church of S. Maria presso S. Paolo is set at half slope of a hill in the northern blocks of Cantù. It is a single room, with an irregular apse. The openings are all on the façade (fig. 1) and in the southern side. The masonry components are rubble and bricks; the interior finishing is a frescoed plaster, the pictures are very precious because of their age (early 16th century) and the skills of the painters (Cristoforo De Mottis and Giovanni Ambrogio da Vigevano).



Figure 1: Façade of Santa Maria presso San Paolo in Cantù

Due to the damage at the wall basis, the frescoes got lost from bottom to 1.70 m up to the ground (fig. 2); major damage is due to humidity, even if the northern side and the vault is better preserved (fig. 3). The church is almost never open; there is not any heating plant. Repeated investigations in 1998 and 2001 allowed defining a diagnosis strategy with the minimum number of measurements for finding out the sources of water infiltration and the major risks for the frescoes (where the higher thermal gradients were found). Psycrometric maps, water content measurement and IRT were used to investigate the damage and risk causes.

ADDRESS CORRESPONDENCE TO: Agia Triada Ano Volos, Volos 38500, Greece

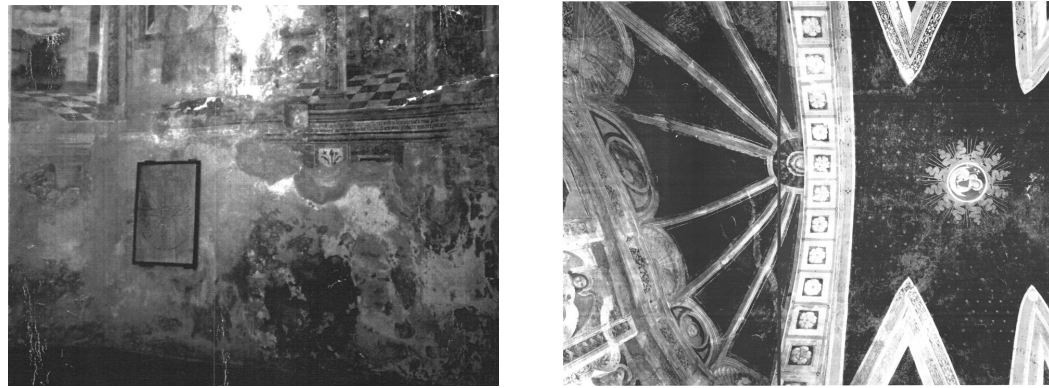
Abstract Number (mandatory): 81

Name (mandatory): N P Avdelidis

Phone (mandatory): +30 24210 42252

Fax (mandatory): +30 2410 626519

E-mail (mandatory): avdel@mail.ntua.gr



Figures 2 & 3: (left) the frescoed apse before the restoration, damage is diffused at the basis of the wall and (right) the vault before the restoration, the fresco has stains due to many infiltrations

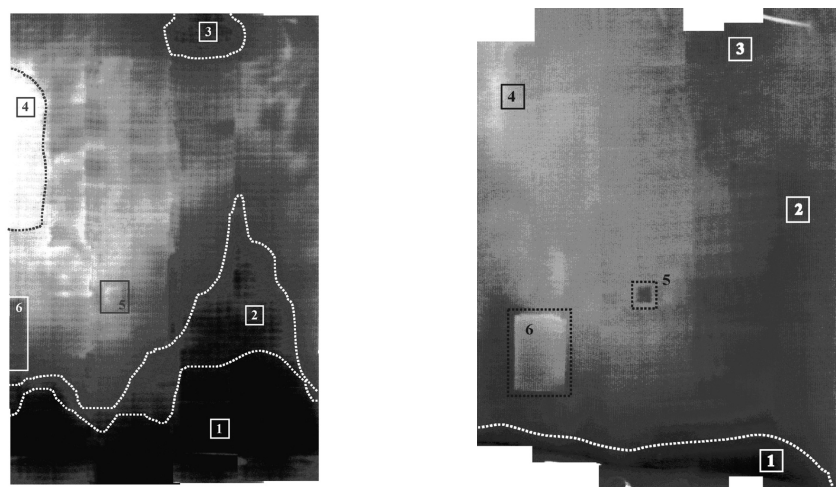
Results & Discussion: IRT for monitoring rising damp and condensation took place.

The first IRT measurements set took place in October 1998. The first shot had a passive approach, in order to survey the natural thermal gradient on the surfaces.

In this way, it had been possible to visualise the critical zones as colder areas, at steady state conditions. Figure 4 shows the right side of the apse, where a substantial non-homogeneity of the temperature distribution was found, due to the different materials and the employed building techniques. For example, in area 4, there is the insertion of a piece of an ancient frescoed brick wall (representing “Madonna del Latte”). At the basis of the wall, there is a dark area, which has a peak on the right (up to 1.80 from the floor), an average height of 0.80. Up to 2.5 m from the floor, there is a very smooth gradient, clearly detectable in the entire wall.

In the same day, a second shot was obtained after the heating of the ambient, after half an hour of convective flux. The increase of the ambient temperature (about 4°C) should allow verifying if the colder zone at basis of the wall was due to condensation. The thermograms (fig. 5) were shot at transient conditions, in the cooling phase. The mosaic shows a different distribution of the thermal anomalies. The colder part is now reduced to a strip 30 cm large. Square 2 and 3 in fig. 4 are colder, while in fig. 5 they have almost the same average temperature of the wall. Comparing the results with the damage assessment, it can be assumed that the origin of the damage is condensation in the colder areas.

Gravimetric tests confirmed the hypothesis. Some samples were collected in the colder areas and as comparison, in the upper part of the masonry. The water content in the masonry (in the surface and 10-20 cm inside) is generally very low. Values of bricks are 0.3-0.4% and 0.4-3.4% in mortars. In the coldest area, the value is 3.4 at 7 cm inside, 15 cm from the floor (fig. 6).



Figures 4 & 5: Thermograms of the right side of the apse

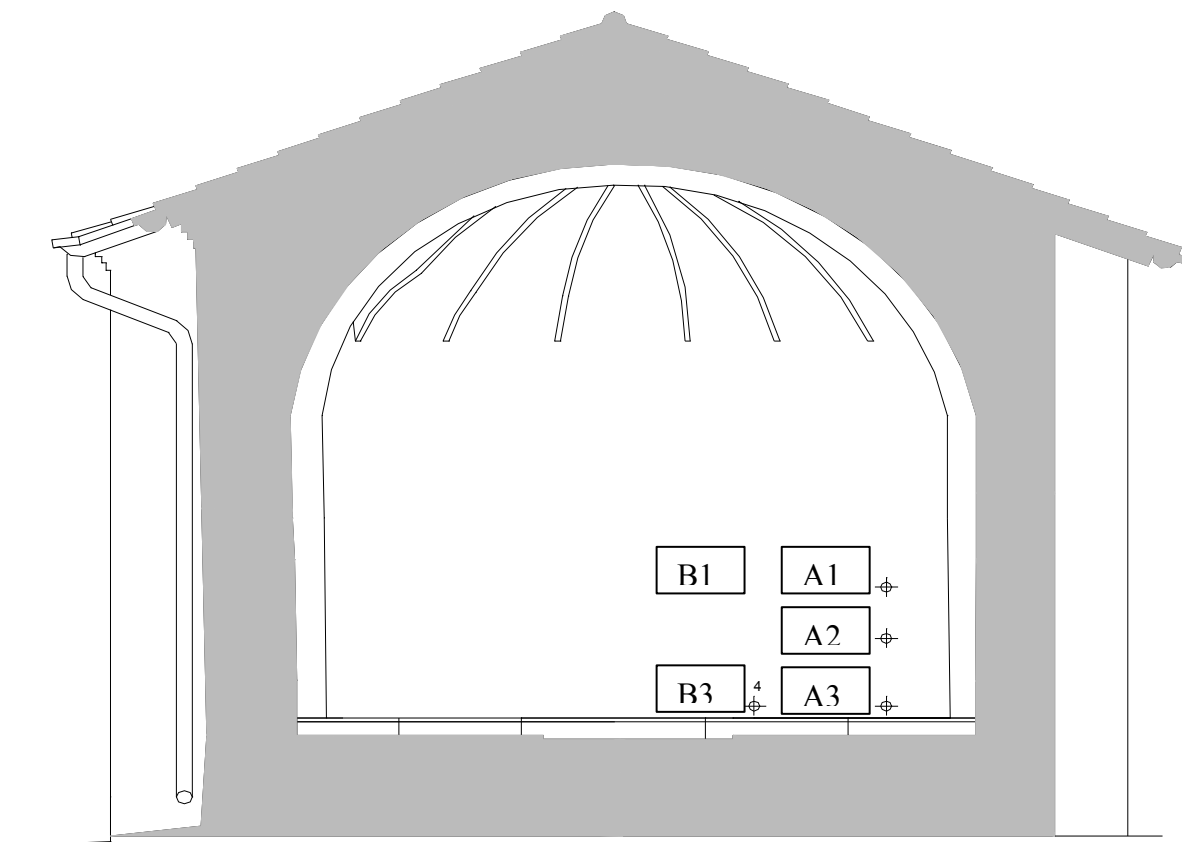
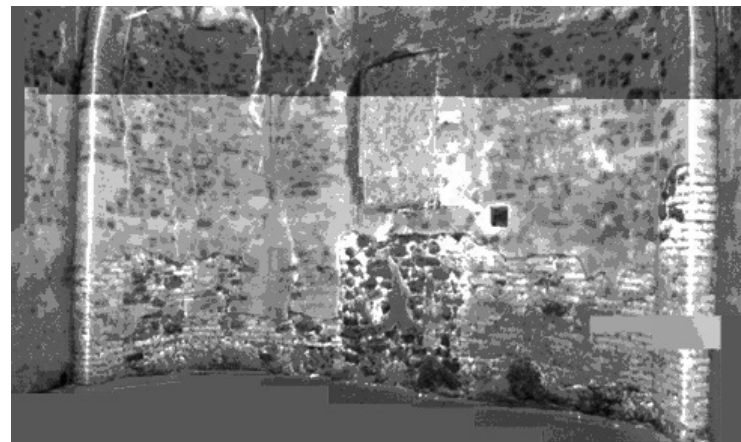
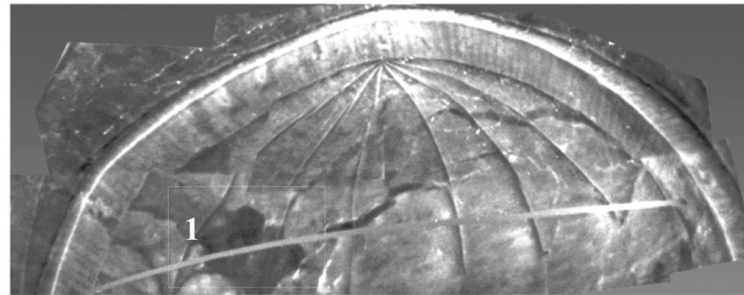


Figure 6: Scheme of the drilling samples

Sample	Height from the ground	Material	RH% Content
A1 (surf.)	140 cm	Plaster	1 %
A1 (25 cm inside)	140 cm	Mortar	0.4%
A2 (surf.)	90 cm	Plaster	1.4 %
A2 (4 cm inside)	90 cm	Mortar	0.6%
A3 (surf.)	15 cm	Plaster	1%
A3 (7 cm inside)	15 cm	Brick	3.4%
B1 (surf.)	140 cm	Plaster	1.6 %
B3 (surf.)	20 cm	Plaster	1.8%
B3 (12 cm)	20 cm	Cement Mortar	1.1 %

Table 1: Water content in gravimetric test 1998

In January and February 2001 a second set of measurements was performed, obtaining similar results. Fig. 7 and 8 shows the further recapture after a higher convective heating ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$) of the ambient air. Particularly, fig 7 shows a colder zone (square 1), which was meant to be a patch in the vault plaster in the further investigation accomplished in 2004. In the cooling phase the IRT shows the texture of the masonry. Rubbles appears at a highly different temperature from the mortar, instead the bricks are not clearly detected: the time of cooling of the two materials (brick and stone) is different and the thickness of the plaster is uneven. So the thermograms were shot taking an average time (about 40 minutes after the end of the heating) and the recapture of the whole wall took about half a hour. Nevertheless, IRT does not show difference in the texture, which could give the reason of the different temperature in the colder area at the basis of the wall, which was shown in fig. 4 and confirmed in the new shots.



Figures 7 & 8: Mosaic of thermograms, January 2001, after convective heating ($\Delta T = 8^{\circ}\text{C}$), shot in the cooling phase. In the vault IRT shows the presence of different plasters (fresco and restoration mortar, the colder areas); thermograms of the apse show the texture of the wall

The gravimetric analysis of samples (collected in the same areas as those in 1998) gave similar results, with an increase of rising damp in the dark zone (sample A3, table 2).

Sample	Height from the ground	Material	RH% Content
A1 (surf.)	135 cm	Brick	0.7 %
A1 (5 cm inside)	135 cm	Brick	0.5%
A1 (18 cm inside)	135 cm	Brick/stone	1.2%
A2 (surf.)	85 cm	Brick	1.3 %
A2 (5 cm inside)	85 cm	Brick	0.6%
A3 (surf.)	12 cm	Plaster	6.9%
A3 (5 cm inside)	12 cm	Lime mortar	6%
A3 (12 cm inside)	12 cm	Stone	7%
B3 (surf.)	12 cm	Plaster	3.2%
B3 (5 cm)	12 cm	Stone	2.6 %

Table 2: Water content by gravimetric test in 2001

The results allowed the verification of the hypothesis that the apse was at risk of humidity due to condensation and rising damp due to a localized infiltration. The apse was built over the city wall and its irregular shape shows

clearly the connection point of the middle-age masonry and the 15th century apse. Unfortunately, the sealing of the connection did not endure in the time and in case of rain the water can spill into the masonry from the joint between the two walls. It is to be taken into account that the exterior of the apse is inside a garden and the lower part of the masonry never receives direct solar irradiation due to a shed. Therefore, the lower

temperature of this part of the wall (clearly showed in the first IRT shot, fig. 4)

A last recapture was shot in January 2004, during the last restoration of the frescos.

The vault and the apse pictures were fixed by means of acrylic resin (the pigmented layer), emulsified in water at 20-30% and hydraulic mortar added with carbonate calcium (for fixing the delamination of the plaster). The intervention began in 2002 and currently the restorers are finishing the last application of fixative (fig 9).



Figure 9: The vault during the last phase of the restoration

The new IRT shot took place after a convective heating of 40 minutes ($\Delta T = 8^{\circ}\text{C}$) of the ambient air. The recapture (fig. 10) allowed identifying the mortar due to an intervention made in the Fifties, checking the renewed adhesion of the plaster to the substrate and localising the consolidant spreading beneath the plaster.

In the previous intervention ('50s restoration), casein was added to the lime mortars; moreover, at a very close visual examination, the surface appears rougher, with a wider granulometry where the fifties patches are. Laboratory tests investigated the porosity of samples collected from the original plaster and the patch. Thermograms show the pattern of the patches in the vault, along the horizontal crack, even where the colour fades and it is not possible to clearly distinguish the two mortars by in sight inspection.

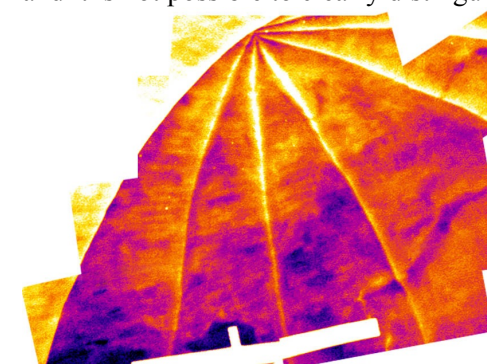


Figure 10: Mosaic of the thermograms: the colder areas correspond to the consolidant injected beneath the plaster

Furthermore, the adhesive status of the plaster is documented by IRT: no delamination can be found (which should be shown as warmer areas during the heating phase). The consolidant injected beneath the plaster, where the delaminations were found before the intervention (fig. 11), now correspond to the colder small areas. The higher density and different thermal properties of the hydraulic mortar determine a delay of the surface heating, causing its lower temperature.

In a previous work by two of the authors [6], it was found that the differences in thermal properties between various building materials and consolidants, it is possible to detect the respiration differences in the material by



Figure 11: Scheme of the consolidant intervention by the restorator

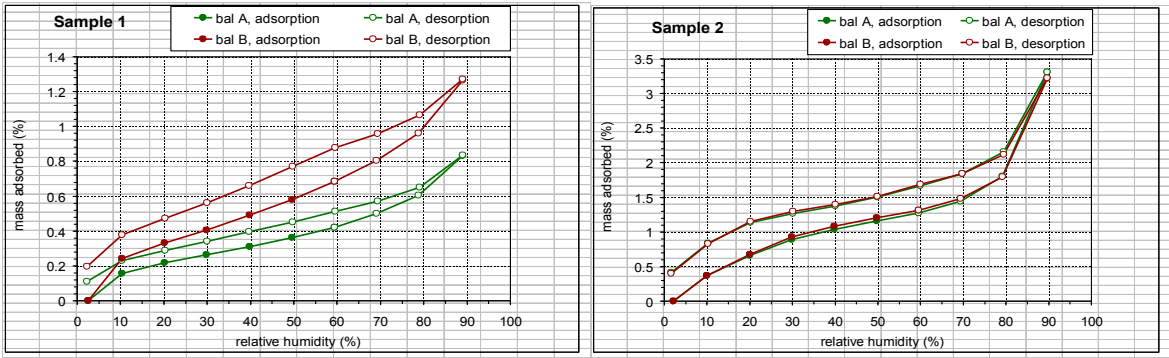
On the other hand, the geometry of the vault and consequently, the uneven heating, prevents to discover the differences due to the components of the plasters at the apex of the vault (the upper part of the vault got a higher temperature while the central zone got the best temperature for the investigation) and at its lower part (a cold stream air licked the savory at the basis of the vault).

Furthermore, some laboratory tests took place. Mercury intrusion porosimetry (measuring range of pores from $\sim 10^{-4}$ to 10^{-9} m) and water sorption analysis (measuring range of pores from $\sim 10^{-7}$ to 10^{-9} m) were used. The first (2000 series porosimeter by Fisons Instruments), allowed the calculation of the total porosity, total cumulative volume, pore radius average, bulk density and surface area. Each sample was submerged in a confined quantity of mercury and was tested up to a pressure of 1,800 bar. Sorption analysis was completed using a CISorp Water Sorption Analyser, under steady conditions of temperature (25°C) and pressure (1 atm), using the gravimetric method, across the range of 0 to 90% Relative Humidity.

Sample	Total Cum. Vol. (mm ³ /g)	Bulk Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Pore Radius Average (μm)	Surface Area (m ² /g)
Sample 1	128.4	2.09	26.8	0.18	3.43
Sample 2	158.4	1.87	29.6	0.21	5.62

Table 3: Mercury intrusion porosimetry results

The adsorption curves show slight differences between sample 1 and 2. The fresco sample, after the application of the consolidant of the pigmented layer and the fixative shows lower permeability to vapour than the mortar of the vault patch.



Figures 12 & 13: Sorption analysis results

Planned conservation requires [7]:

- A deep knowledge of the building, in order to identify points at risk, problems of compatibility between different materials, parameters to be controlled in order to avoid the rising of defects.

- A study of the best ways to use the building, so that basic prevention takes place.
- A close control of the real interventions, often more or less varied from the projects.
- Repeating of tests at scheduled times, in order to detect failure processes at their very beginning, so that it will be possible to give “a stitch in time”.

As the case study shows, passive approach cannot distinguish the differences of components, but only the surface gradients due to moisture or high differences of thermal characteristics.

Using active approach, reliable and succesfull tests can be accomplished; the duration and kind of heating is the key factor to obtain information.

As long as the heating is concerned, different layers can be detected. For instance, the differences of the plaster in the vaults or the texture beneath the plaster were detected. The study case showed up that:

- First coming (within 10 minutes): differences of components in the mortars
- Second coming: high difference of surface materials (stone and mortar)
- Third coming (dependently on the thickness of plaster and its properties): texture of the wall.

Identifying differences and discovering the hidden structures of the masonry is the main way to understand which are the risk points, and which are the problems and the probable failure modes. The use of IRT is a simple and non-destructive way to have a glance at the irregularities of the masonry.

Conclusions: The possibility to include IRT among the techniques for planned conservation depends on the reliability of the procedures in the field and its low costs. The common use of IRT in detecting differences of texture in plasters and masonries may be useful if adopted with the vision of identifying risk areas and compatibility problems. Recent experiences show the possibility of using IRT for mapping effectiveness of surface restorations, and this is a useful tool for planned conservation as well. As a monitoring technique, IRT is needed for some experimented procedures and standards; a photogrammetry or rectification support can decisively improve the data comparison and add significance to the valuation of the results.

References:

[1] N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, P. Theoulakis, Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging, *Journal of Infrared Physics & Technology* 44(3), pp. 183-190, 2003.

[2] N.Ludwig, E. Rosina, V. Redaelli, F. Augelli, *Methods IRT for Moisture Detection in traditional buildings materials: wood and plaster*, 6th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, CNR; Pisa (Italy), September 2003.

[3] S. Della Torre, “‘Manutenzione’ o ‘conservazione’? La sfida del passaggio dall’equilibrio al divenire”, in *Scienza e beni culturali. Ripensare alla manutenzione. Ricerche, progettazione, materiali, tecniche per la cura del costruito*, Venezia 1999, p. 75 (Atti del XV Convegno di Studi, Bressanone, 29 giugno-2 luglio 1999).

[4] E. Rosina, G. Roche, Microclimate monitoring assures the long lasting preservation of frescoes, 7th International Conference PnDA applied on Cultural Heritage Art 2002, Antwerp (BE) 2002.

[5] E. Rosina, N.Ludwig, L. Rosi *Optimal Conditions to Detect Moisture in Ancient Buildings. Study Cases from Northern Italy*, Thermosense XX-An International Conference in thermal sensing and imaging, diagnostic applications, Orlando USA 1998.

[6] N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, Review Paper: Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, *Journal of Cultural Heritage* 5(1), pp. 119-127, 2004.

[7] S. Della Torre, ed., *La Conservazione Programmata del Patrimonio Storico Architettonico: linee guida per il piano di conservazione e consuntivo scientifico*, Milano, Guerini, 2003.

Archaeometry **51**, 5 (2009) 715–732 doi: 10.1111/j.1475-4754.2008.00433.x

3. LOCALIZING HISTORICAL CLUES USING IRT AND PETROGRAPHIC ANALYSES AT VILLA MIRABELLO, MONZA (ITALY)*

E. ROSINA, S. DELLA TORRE and P. GASPAROLI

Politecnico di Milano, BEST Department, V. Bonardi, 9–20133, Milan, Italy

L. LAZZARONI

Via Aguggiari 18, 20052, Monza, Italy

L. DI BELLA

v. Magrini 4, 24126, Bergamo, Italy

A. CASTIGLIONI

Via G. Giusti 3, 20154, Milan, Italy

M. RADAELLI

Via Amendola 17, 20052, Monza, Italy

and C. SOTGIA

CSG, Palladio s.r.l., Strada Saviabona 278/a, 36100 Vicenza, Italy

The rebuilding of Villa Mirabello started in 1666. Built on designs of Gerolamo Quadrio, the project refurbished and enlarged a smaller 16th century country house ('casa da nobile e da massaro'). Archival documents report on the remodelling, which consisted of selective demolition of portions of the structure, re-using most of the masonry as the core of the new building, and the reinforcement of retained masonry by insertion of 'ceppo' stone quoins to update new exteriors. The aim of Quadrio was to create an elegant and sumptuous mansion, suitable for noble owners such as Giuseppe Durini and his family. The plan and a small part of original finishing ('marmorino' plaster decoration) are recognizable nowadays. Nevertheless, there are many questions in interpretation when one compares the documents and the building. That is, Cardinal Angelo Durini made a major modification in the 18th century, and further minor changes were made in the 19th century. Although these latter modifications did not alter the plan, they changed the distribution of rooms and masked both decoration and finishing. After over 20 years of neglect, Villa Mirabello is now close to being restored. Architects in charge ordered a preliminary set of diagnostics to assess damage and study the historical evolution of the building. Integration of IR thermography (IRT) and endoscopy allowed restorers to detect the structure's texture underneath the plaster, and to detect openings filled with masonry. Moreover, archive documents confirmed these results and, above all, defined a date for the use of specific building techniques. This research constitutes a reference for buildings set in the same time and location that do not have significant archival documentation. Active IRT provided useful information for structural assessment (such as location of arches, chimney stacks, different thickness of wall, wooden elements, voids, beams etc.) and for crack pattern evaluation. This information directs design professionals working on this conservation project, and helps define the costs of intervention.

KEYWORDS: ITALY, 17TH CENTURY, IRT, STRATIGRAPHY, DURINI'S 'VILLA', BRICKS, COBBLES, 'MARMORINO'

*Received 8 November 2007; accepted 4 June 2008

© University of Oxford, 200



Figure 1 Villa Mirabello, main entrance.

PRESENT SCENARIO AND HISTORICAL OVERVIEW

Villa Mirabello is located in the Parco di Monza, near Cavriga Avenue and the Lambro River. It is the most ancient mansion in the park. Durini's family built it up from an existing smaller house during the mid 17th century (Di Bella and Lazzaroni 2004). In the 18th century, Durini's family designed a new extension of the park of Villa Mirabello, and a new villa, which was named Mirabellino, was placed opposite Mirabello. At the beginning of the 19th century, the Royal Park of Monza included Durini's properties. Nowadays, the Monza park is a public estate, owned by the city municipality (Fig. 1).

Villa Mirabello was neglected for many years. However, in the past decade renewed interest led the municipality to commit to a restoration project for the villa. Accordingly, a diagnostic and historical research campaign started. Damage assessment concluded that the most urgent intervention is needed on the first floor. That is why preliminary investigation began at the first level, consisting of IRT (infrared thermography), endoscopy, petrographic analysis, and measured drawings. Historical documentation contains information about the whole complex. Archival documents describe directly the work of the 17th century construction site (Di Bella and Lazzaroni 2006, 49–73). However, later documentation only indirectly describes building modifications in the following centuries, because the documents are notary's acts. Their contents deal with inventories of objects and furniture, which are linked to variation in the use of rooms, but they inform us only indirectly about building modifications.

Detailed descriptions from the 17th century effectively define uses of rooms and functions of structures. This paper records the first results of this preliminary investigation, comparing historical documentation and non-destructive diagnostics. The focus of the initial non-destructive testing is to map the texture of structures beneath plaster. In addition, IRT aids in damage assessment, to determine the total extent of delaminated plaster and other finishes. Results of IRT were verified by endoscopy and stratigraphic sampling.

The aim of comparing historical data and scientific analysis is to achieve the widest knowledge of the building, its historical evolution and its refurbishment over the centuries, which could have caused structural weakness and building vulnerabilities. The effectiveness of any further design of adaptive re-use and/or restoration project depends upon the identification and advanced analysis of these critical zones in order to pinpoint which new uses can best fit the actual capacities of structural elements.

In scientific research, advancement comes from the application and integration of both proven and innovative techniques, with the aim of solving real issues. The proven techniques verify the results obtained by newer innovative or remote sensing techniques. Because of the high variability of historical building materials, building techniques and states of conservation, each case study depends upon results from previous experience, adapting procedures and methods to meet the specific requirements of the building.

In the case of Villa Mirabello, the historical research showed that Count Giuseppe Durini (the Count of Monza's younger son) built Villa Mirabello using elements from a pre-existing building between 1666 and 1675. Architect Gerolamo Quadrio signed the design drawings. He was architect for Veneranda Fabbrica del Duomo di Milano, the Milan Cathedral, and was one of the most prominent professionals in Lombardy during that time.

Documentation regarding the construction site is conserved in the Durini Family Archive (Archivio Durini, Villa Durini in Alzate Brianza, '*Stima dei lavori realizzati tra il 1666 e il 1675*', signed by G. Quadrio, architect); the present authors consulted this in order to ascertain the use and location of each room in the 17th century.

The villa had two entrances: a stair, with a decorated balustrade connected the Lambro River side with the eastern minor hall (nowadays, the stair no longer exists); a porch in a garden shaded the western entrance where it transitioned to a double-height hall, which was the main entrance (at present the only entrance remains from the porch). The main hall stretches to majestic dimensions, and it is at the core of the complex. The noble's apartments (ground and first floors) are set around the hall; rooms are aligned in a typical *enfilade* format. The main hall was used for official ceremonies and entertainment. Originally, on the first floor, over the porch, was a loggia with columns lining up with the columns of the porch. Currently, three windows and a balcony take the place of the loggia.

Two wings are attached to the central building: the southern wing hosted a 'gentlemen's hall', a kitchen, a breakfast room, pantries, and ended with a stable with granite columns and cross vaults (at present this is used as the Park Library). The northern wing's plan is partially missing, but according to the authors' research the central part was the family chapel, while on the northern part was the press room. Construction documents of 1669 explain in detail the locations, uses and furniture inside the listed rooms, but do not refer to rooms behind the chapel, which should connect the chapel to the central building.

A sumptuous staircase connects the entrance porch at ground floor with two noble's apartments on the *piano nobile*. One of these is located in the central building, the second has a minor extension, and is located in the southern wing. Servants' rooms were set in the last part of southern wing.

Until the end of the 18th century, Mirabello remained the property of the Durini family. Cardinal Angelo Maria Durini was the last owner to live in Villa Mirabello. (Cardinal Durini inhabited the villa from 1776 to 1788. After his death, in 1796, three nephews inherited the villa. They sold it to Count Sanseverino in 1804. In 1806 the villa was included in Monza Park. Further information is available in the references.)

Cardinal Durini modified the complex according to 18th century fashion: he moved stables and servants' rooms, connected spaces in new external courts, enlarged the southern noble's apartment on the *piano nobile*, infilled the loggia on the *piano nobile* and decorated the new facade with a curved tympanum. He replaced the ancient stable with a new library and press, and connected rooms that hosted a new art gallery (he was an esteemed collector) and a billiard room.

The Monza Royal Government and Park acquired Mirabello on 1 December 1806. During the 19th century, the villa served as the park administration site and as the farm manager's house. Occasionally, famous guests of the royal family inhabited the villa for a while. Mostly, the villa became an agricultural centre.

A period of neglect began in the 20th century, which has lasted until now. Currently the park administration occupies the ground floor of central building, while the Creda Library is set in the southern wing. The northern wing was partially used as a private apartment until a few years ago, and the 17th century chapel, since it is well preserved, is still in use.

The most serious neglect occurred on the *piano nobile*: in the central building and northern wing roof leaks spoiled frescoed vaults and wooden ceilings. Recently the main hall underwent restoration, and at this moment designers are studying a preservation plan for the central building.

MATERIALS AND METHODS

Infrared thermography was used to map masonry texture of the surfaces of rooms 2.1, 2.2, 3, 5, 6, 8, 9, 10.1, 10.2. The total area investigated was 1.500 m². The materials investigated were lime plaster and lime mortars, cement plaster and wallpaper in limited zones (rooms 6, 8 and 9). A digital psychrometer measured ambient temperature/relative humidity (T°C/RH) during the tests. Endoscopy verified the location of cracks, voids, chimney stacks and masonry infilling around the doors. In addition to *in situ* diagnostics, some samples were collected from

wall paintings and mortars in order to perform petrographic and X-ray spectrometric analysis. Petrographic studies were conducted with a polarized microscope (based on NorMal 12/83).

The observations were performed on thin sections which permit classification of the homogeneity, the characterization of the aggregates and of the cementitious binder, the determination of the micromorphological characteristics, granulometry and porosimetry. These studies aid in understanding the aggregate's origin and conservation state.

The microstratigraphic study (based on UNI 10945:2001) was performed by microscopy in reflected light and in UV light on cross-sections (reference preparation NorMal 14/83); analysis was conducted with an electron microscope (ESEM) and microanalyser (EDS) on every layer, and microspectrophotometric analysis (FTIR) in attenuated total reflectance (ATR) or reflection modality in the more important layers.

Results of microstratigraphy, or thin cross-sections, permitted the identification of components, pigments and media of decoration. Identification of pigments and a study of painting techniques contributed to documenting the building's historical evolution and state of conservation of internal finishes.

Thermal methods for mapping masonry bonding in Villa Mirabello

The active approach of IR thermography (IRT) has proved its validity in finding hidden structures, openings and wall texture underneath plaster (Ludwig and Rosina 1998; Schuller 2003). Temperature patterns detected by thermography are analysed in real time, allowing feedback on site (Sansonettil *et al.* 2003). In the past decade, research has been carried out to standardize IRT procedures, and the technique has benefited from mathematical modelling of heat fluxing across building structures (Grinzato *et al.* 2001; Rosina and Grinzato 2001). Nevertheless, each application requires a specific analysis in order to overcome obstacles; building materials are not standardized, because of the arts and craft production of each element (at least until the industrial revolution of the 19th century) and, above all, because of different modifications and damage occurring over time.

Infrared thermovision is a telemetric technique of infrared irradiation measurement; because any body at a temperature over 0 K emits infrared radiation, its emitted energy can be detected by a infrared sensor and visualized as an electrical impulse on a display. IRT measures a bidimensional map of radiometric intensity and transforms it into a representative image of surface temperature distribution.

By stimulating properly the internal boundary conditions with a suitable artificial heat source, an active heat flux is created. This flux causes a surface temperature pattern which varies according to the different thermal properties of the materials of a structure. After

homogeneous heating, surface temperatures reveal information about internal structures of masonry during the heating–cooling process.

Current thermographic equipment has a thermal resolution of around 0.1°C, therefore thermal stimulation need only generate a difference of temperature between the analysed point and the reference one unit higher than this threshold (IR Thermovision, FPA Avio, TVS 700

LW, LW = 8:14 mm, microbolometric system).

The quantitative approach of typical dynamic thermography has been studied on historical buildings since 1996 (Bison *et al.* 1996). Dynamic thermography solved in time (TRIR) allows the researcher to invert thermal problems in order to obtain information about the characteristics of materials and the geometry of surfaces from their thermal behaviour during heating and cooling (Vavilov *et al.* 1994). Dynamic thermography relies on a relative calculation technique: the difference in surface temperature between areas is the thermal signal, and it is a function of time. Thermal contrast is the ratio between the thermal signal and the reference temperature. It has a maximum at a certain time, and its amplitude is proportional to the imposed flux. It is known that the amplitude and the time of maximum difference depend primarily on the depth of the defect and the thermal diffusivity of material, and secondarily on the thickness of material, given consistent dimensions and thermal characteristics of the materials. Transient tests are effective in detecting plaster delaminations (Grinzato *et al.* 1998): thermal tomography is a proven procedure to locate voids within the thickness of plaster. Experiments on frescos (Schirripa Spagnolo *et al.* 1999) have shown its feasibility on laboratory specimens and *in situ* (Grinzato *et al.* 1994). Nevertheless, only small areas can be analysed at a time, first because the even irradiation of surfaces can be applied only on a limited area (about 2 m²); second, because the spatial resolution of commercial thermocameras favours a small field of recapture for shooting sequences; and third because of the huge amount of data produced by the test, which has to be processed (despite modelling the case of a semi-infinite medium, and by considering only the monodirectional flux crossing the bulk material) (Ludwig and Rosina 1998). Finally, lamps for irradiation are highly energy consuming (500 W and more for each), and usually only a few of them can be used at the same time in the field, because of the limitations of electric systems in buildings before restoration. In practice, analysis can be performed only on areas smaller than 1 m² at a time. Moreover, distribution of a surface's temperature depends on the energy absorbed by each element, and the morphology, location, shape and variation of surface optical

properties of artificial heating sources do not allow a uniform energy absorption over large areas.

Despite the normalization of the thermal contrast at the maximum value of temperature for each point of surface, the surface heating varies sharply and it leads to parallel fluxes to surfaces, which generate other maximum contrast peaks (Grinzato *et al.* 1995a,b). This factor limits the use of dynamic IRT in analysing damaged historic surfaces. While convective heating helps to overcome this obstacle (Vavilov *et al.* 1992; Bison *et al.* 1998), it can not supply a 'pulsed' heating, even a long pulse; in addition, the amount of heating can not be considered constant in transient procedures.

In the study case of Villa Mirabello, calculation of heating requirements for the thermal tests showed the presence of many air leaks and uncontrolled convective fluxes caused by air coming from the windows (some of them do not have frames and panels), and large holes in the vaults and ceilings. In the studies at the Villa Mirabello, heating time calculations were not successful using simple models, such as semi-infinite modelling, thermal resistance capacity (RC) calculation models or finite difference models, because of noise and uncertainties due to:

- (1) convective flows on the interior surface, air infiltration – exfiltration (in historical buildings natural ventilation control is harsh, even if windows are covered during the test);

- (2) significant air convective flows on the interior surface due to air stratification inside the room—the air is cooled by contact with the vaults (which also cool the wall surface);

- (3) lack of knowledge concerning the exact thermal transmission properties; varying conditions at boundaries before tests and significant thermal inertia of building components (moisture dependent).

Simulations with heat and moisture transfer (HMT) portrayed a first heating period during which the heat impulse gets into the wall and only the thermal capacity of the plaster is involved. Obviously, when the impulse reaches the masonry (layer by layer), its thermal capacity is active too. The transient phase when the impulse reaches the masonry wall is not determined by a single point and so simulations and analytical models cannot weigh the strong influence of noise and the uncertainties discussed above. It can only provide a first pre-dimensioning of heating time (variable room by room between 60–70 and 150–180 min), but the exact heating time can only be achieved experimentally.

The IRT images were taken after heating ambient air by means of two fan coil heaters (14 000 kcal/h and 25 000 kcal/h power) on 10 and 22 November 2006, and 18 January 2007. Due to the thickness of the plaster (about 3 cm), operators calculated a heating time of 120–180 min and a final air thermal gradient of about 10°C in larger rooms; 60–70 min and an air thermal gradient about 20°C in the smaller rooms.

The ambient conditions during testing were:

- (1) 18 January 2007, recapture of room 2.1; during heating, RH = 88–25/31%, T = 6–28/33°C
- (2) 22 November 2006, recapture of rooms 3, 5, 8, 9; during heating, RH = 63–30%, T = 11.5–29°C
- (3) during cooling, RH = 30–47%, T = 29–23°C
- (4) 10 November 2006, recapture of rooms 6, 10.1, 10.2, 2.; during heating, RH = 81–44/52%, T = 11–23/25°C; during cooling, RH = 52–65%, T = 25–15°C

Because of the large volume of the rooms, the lack of vaults and ceilings, and the lack of doors and window panels, operators sealed openings by means of polyethylene sheets. To heat the interiors more uniformly, operators applied air diffusers to the fan coil heaters.

Due to the difficulties explained above, the quantitative approach in the Villa Mirabello study case was adopted only on small areas. A preliminary scanning, visual analysis and archival information determined those zones where the conditions of the surfaces and the building techniques were known. On these areas, one shot was recaptured before heating, one after 600 s of heating (after an increase of ambient temperature of more than 12°C), after 1200 s, 3600 s (room 3), and 5600 s (room 2.1). A further shot was taken 10 min after the end of the heating, according to the experimental procedures reported in the scientific literature (Ludwig and Rosina 2005; Spanò *et al.* 2005).

Data processing consisted of calculation of the increase of temperature, and data were expressed as a function of the square root of time. This method was used to locate plaster delaminations and patches, cobbles and stone quoins.

Figure 2 shows an example of an analysis on wall A, room number 3. Ambient temperature before heating = 6°C, after 10 min of heating = 17°C, after 20 min = 27.8°C, after 70 min = 32.6°C. Outside temperature during the test = 4°C.

The increase in surface temperature was calculated on the sound area (T5) and four other zones in the same recapture (Fig. 3); the figure shows the increase of temperature after the first 10 min of heating. The thermal behaviour of the sound areas is similar to the behaviour of the surface coating sound mortar beds. Where delaminations and surface damage (increase of porosity, plaster losing binder, stains, salt efflorescence, etc.) occur, the surface temperature

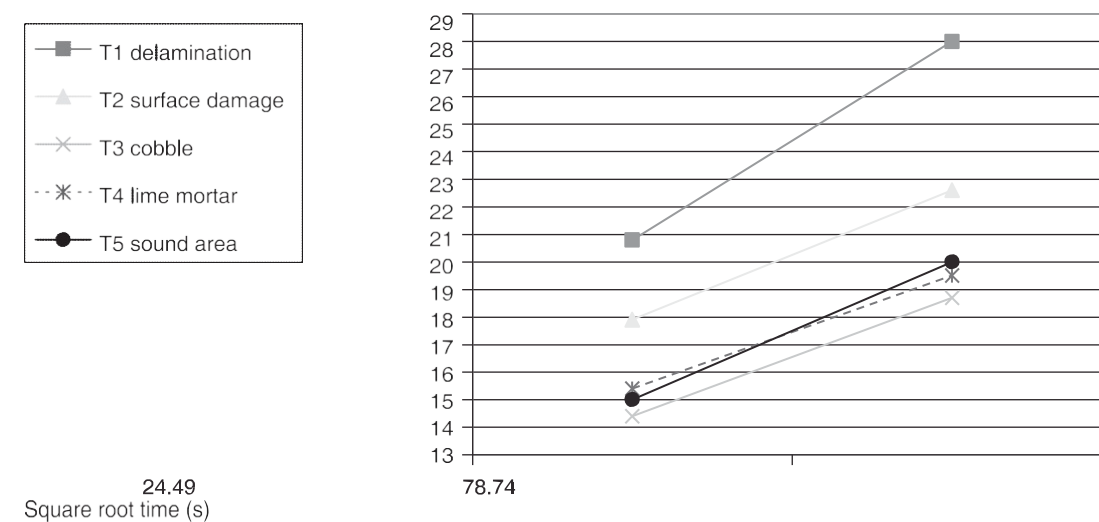


Figure 2 Temperature increase on five small areas (shown in Fig. 3).

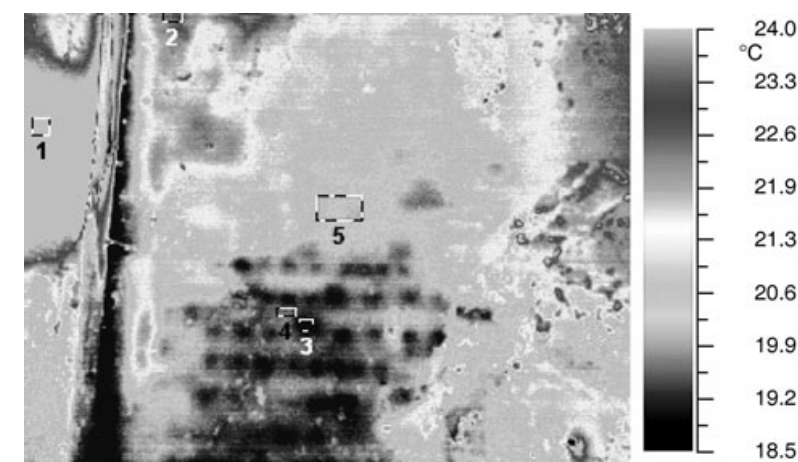


Figure 3 Thermogram of the western wall (A) of room 3, shot at 5600 s after beginning the heating. Dynamic analysis was performed on areas 1–5, as shown in Figure 2.

increases more rapidly (T1 and T2); plaster surfaces covering cobbles have a temperature increase significantly smaller than in sound areas.

The comparison between thermograms shot at 3600 and 5600 s in these areas and in the nearby ones, including the reference area, helped to distinguish false alarms from the thermal signals representative of defects in the researched areas. Therefore, a semi-quantitative approach, similar to those used in previous studies (Volinia 2000), was used to map the masonry textures in the rooms.

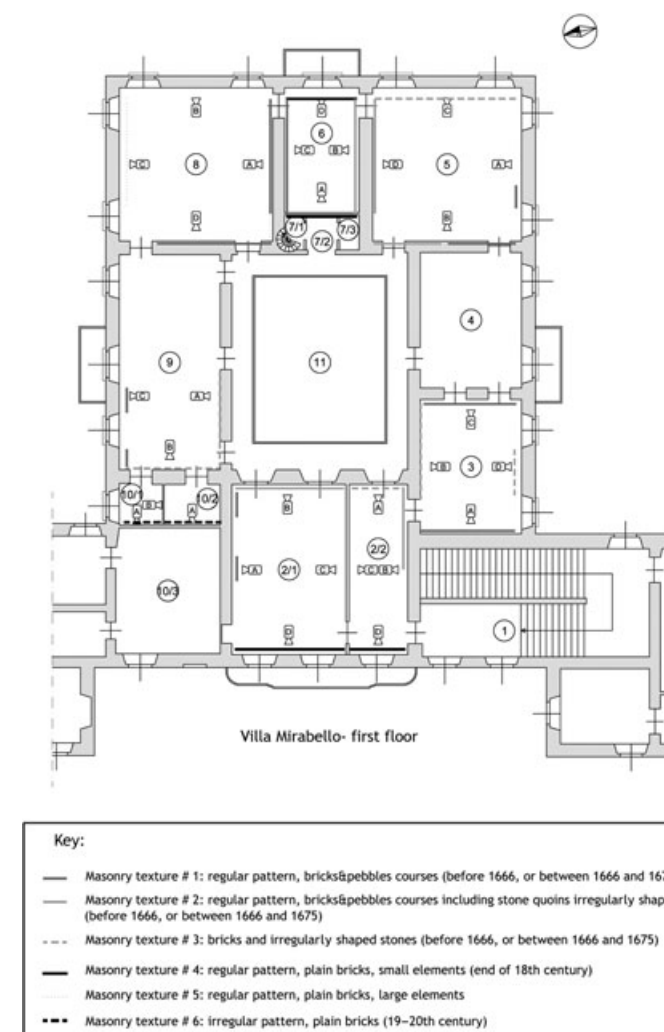


Figure 4 Plan of the first floor showing results of integration between historical research and IRT.

RESULTS

IRT showed four texture typologies: their location within the building confirmed the historical hypothesis of the building's evolution. A unique texture, timber framing, was found between rooms 2.1 and 2.2. It is totally different from the others, and it was used for subdividing the existing large room facing the facade, on the *piano nobile*. Most importantly, our investigation at the Villa Mirabello permitted mapping of four kinds of recurrent texture: bricks and mortar, cobbles and bricks embedded in alternate horizontal courses, bricks and a few stone quoins (irregularly shaped), and the timber frame wall. Figure 4 shows the location of these textures within the villa's plan.

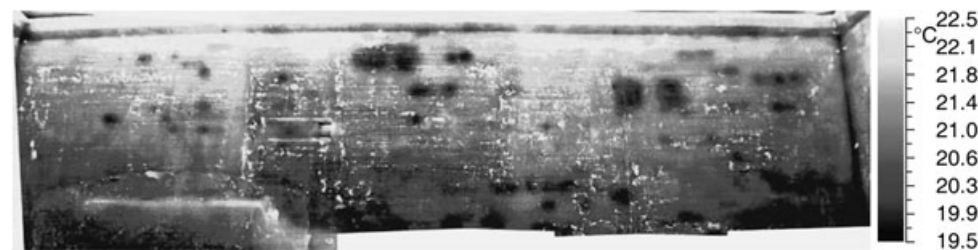


Figure 5 Composite IR thermograms of the northern wall (B) of room 3. It shows a regular pattern of bricks, in which stone quoins are inserted (dark spots). 'Ceppo' quoins have different shapes and sizes. IR thermograms were shot at 5600 s from the beginning of heating by convection. The image shows thermograms with the same range of temperature. The bottom of the masonry was colder (in the picture, darker coloured) than the upper part. Despite the use of diffusers at the air exit from the heaters, the base of the masonry received a lower amount of heat.

The main results are listed briefly below:

- (1) The first-floor masonry shows evidence of significant remodelling and enlargement of an existing house. Quadrio preserved all existing walls which could be included in his project and he consolidated ancient masonry, if required, to ensure structural support of a new roof. Historical documentation explains the consolidating technique: builders inserted 'ceppo' stone quoins into brick masonry. These stones are now recognizable using IR, because of the different thermal characteristics of stone and brick (Figs 5 and 6). Seventeenth century masonry, which was refurbished, has a regular pattern. Three typologies resulted for that period: bricks and cobbles, *ceppo* quoins and cobbles, and bricks and *ceppo* quoins. The latter two building techniques were used to strengthen pre-existing ones, along both exterior and interior walls. Moreover, historical documentation refers to the consolidating use of *ceppo* stone in masonry. Another typology (bricks and cobbles), could be dated to both the 16 and 17th centuries. In fact, it could have been included in 17th century remodelling, without any modification if it was in good condition, or it could have been rebuilt during Quadrio's modifications, with the same building technique as that used in the 16th century (which lasted until the 20th century in most of the Padana Plain).
- (2) Investigations in rooms 2.1 and 2.2 solved some enigmas regarding locations of rooms before the 18th century remodelling. In fact, in this area was a loggia which now is walled up. Later, it was subdivided by a transverse wooden frame wall. Further investigation (endoscopy), found two granite columns inside this wall, very similar to the ones at ground level. Moreover, IRT shows a large hidden arch in the 'B' wall of room 2.2, over the present entrance door (Fig. 7) (the investigated 'B' wall is the rear of the staircase). The presence of an arch means that the entrance door was wider than the present one and that the stairs were changed during their original construction, probably because of weakness in the roof-supporting structures (from a report in the historical documentation).
- (3) Another arch (Fig. 8) was discovered in wall 'B', room 9. Let us hypothesize that it was an entrance to a private hallway for the Cardinal Durini, which connected this part of the apartment to a gallery on the chapel side, close to the altar. Only archival documents mention this hall. In fact, nowadays no traces are found, apart from IRT detection of the arch. Moreover, observing the arch shape and dimensions, the present authors noticed that the left pillar of the arch is lacking, and wall 'A' leans on 'B'. Therefore 'B' belongs to the first building campaign,

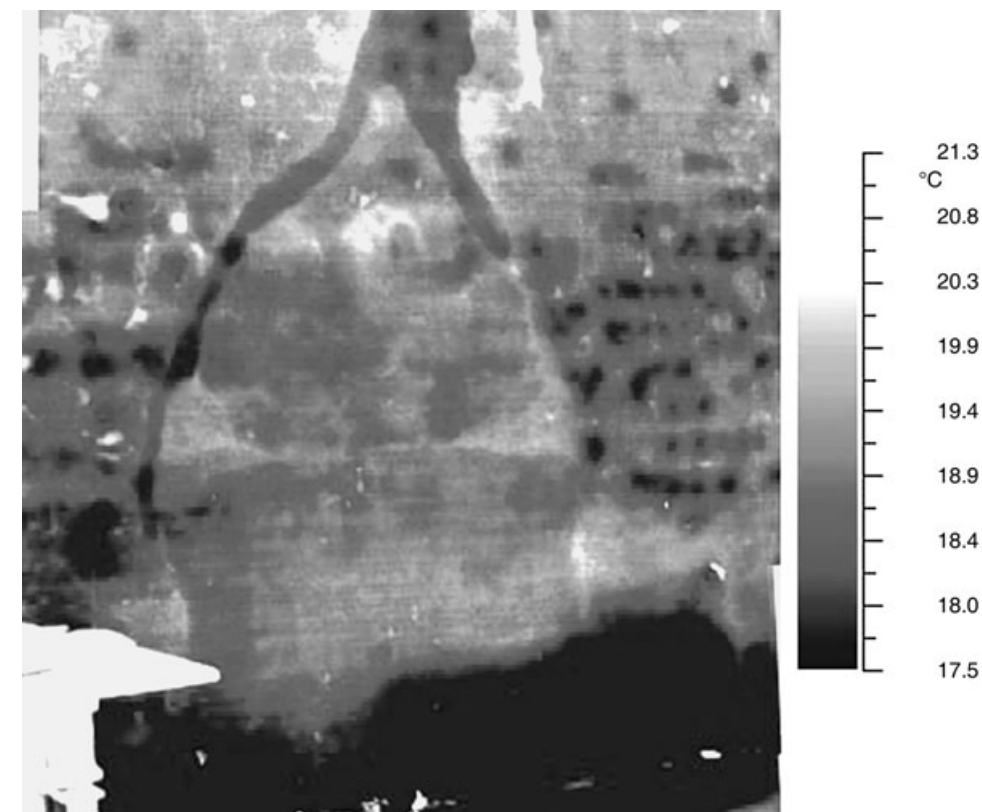


Figure 6 Composite IR thermograms of the northern wall (A) of room 2.1. It shows an infilled opening and arch-shaped plaster patches. The infilling of the opening consists of bricks; the surrounding masonry has a brick and cobbles texture. Uneven heating caused a colder strip at the base of the masonry. Thermograms were shot at 5600 s. A further shot, at 7200 s, showed a similar texture in the lower part of the masonry.

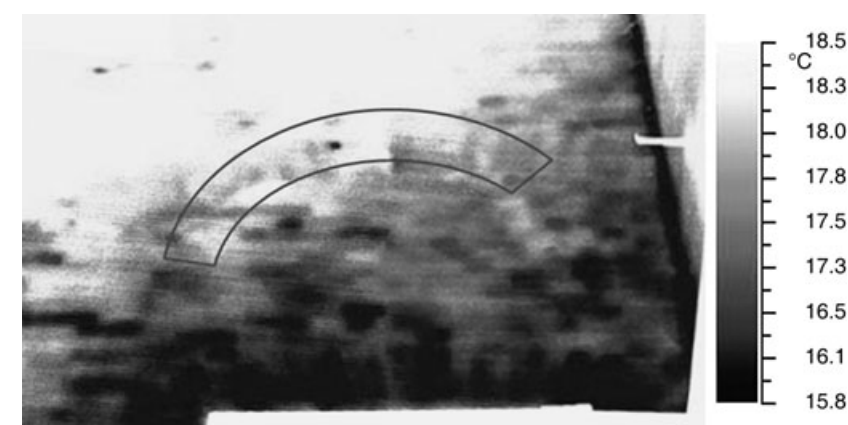


Figure 7 Composite IR thermograms of wall 'B', room 2.2.



Figure 8 Composite IR thermograms of wall 'B', room 9. Thermovision allows the detection of a large arch over the left-hand door. In infrared, the channel of a stove chimney can be seen as refilled masonry in the central part of the composite thermogram (the warmer circular area is the plastered hole of the stove's smoke tube).

and it was used by Quadrio for the new hall. At the end of 18th century, a new remodelling erased any traces of the gallery, and its door was walled up.

- (4) IRT detected many 'stitches' in the walls, the interweaving of different masonry fabrics and plaster patches: all these details are not visible by visual inspection. Archival documentation describes them in detail, unfortunately without locating them. Under some plaster patches, the masonry was also redone. Petrographic and spectrometric analysis confirmed the IRT results. For instance, in room 5, the composition of wall D mortar bedding is different from the mortars of other walls; the list of components includes crumbled bricks. The same component was found on the other side of the masonry wall, in room 6 (Fig. 9). On the other hand, porosity and granulometry (the ratio between sand and binder) are similar in all samples. Results validate the hypothesis that the masonry between rooms 5 and 6 belonged to a existing building before Quadrio's refurbishment.
- (5) Petrography, microstratigraphic and spectrometric tests were applied at the *piano nobile* to investigate plasters underneath recent coatings and paints. Almost all plasters are lime mortars, with siliceous and partially carbonaceous sands. These are in contrast to 'marmorino' plasters,



Figure 9 Stratigraphic samples of plaster in room 6, southern wall, showing the plaster layers.

which were found in the staircase and in room 5. Components of 'marmorino' samples include lime mortar, marble powder and aggregate. Samples were collected from vault plasters and from the upper part of walls, where painted strips commonly decorated vaults. ESEM, EDS microprobe and FTIR analysis were performed on these samples (Fig. 10). Analysis results identified paint pigments and media components, and therefore, together with art historical assessment, permitted the dating of pictures. Many samples of wall paintings have pictorial layers with magnesia lime and added organic media which deposited calcium oxalate in most exterior layers (Fig. 11). The painting technique, pigments (ochres, Sienna, iron oxide red, white lead, carbon black, smalt, green earth) and style were mostly attributed to 17th century fashion (Fig. 12). Therefore, Quadrio completed his remodelling with sumptuous decoration, which is well preserved in most of the *piano nobile* rooms. An exception was found in samples taken from a lathing vault in room 3: among pigments, researchers found artificial ultramarine blue, a colour that has been employed only since the 19th century (Fig. 13). Style and shape confirm its recent origin.

- (6) In addition, results of the investigation identified the location of Cardinal Durini's modifications, made at the end of the 18th century. The *piano nobile* loggia (facade) and vestibule at ground level (towards the Lambro River) were substantially changed and filled in. In fact, from archival research, it is known that the cardinal changed the use of numerous rooms, and

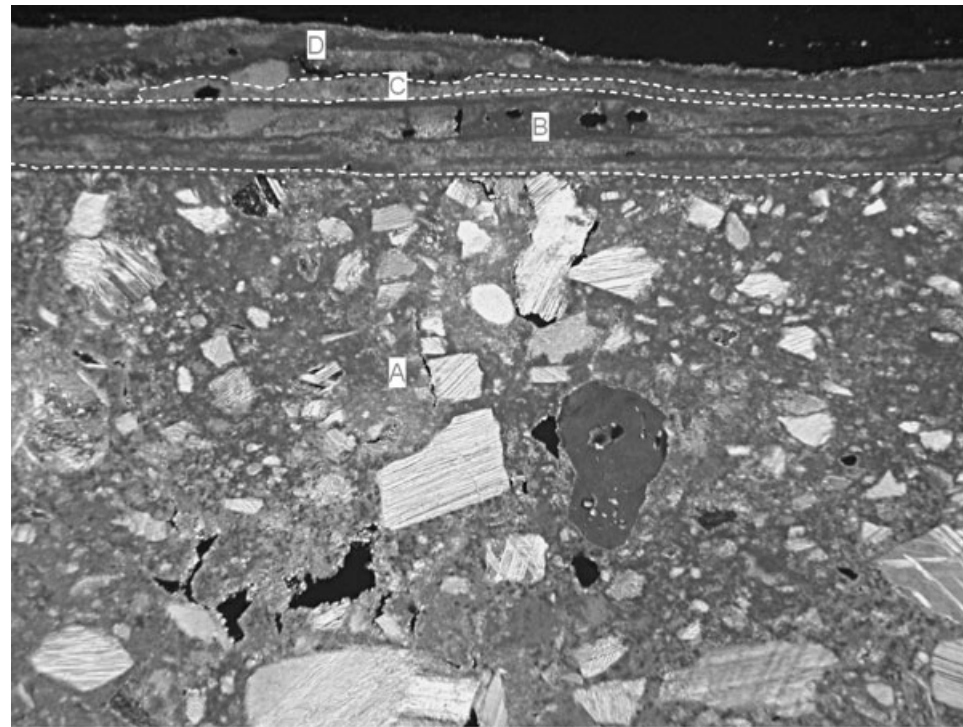


Figure 10 'Marmorino' plaster, sample from the staircase, showing the texture of the sample. Mineralological- petrographic optic microscopy (MPOM) photography, transmitted light, thin section 80 \times N+. Layer A, 'marmorino' containing carbonated lime, with marble fragments and powder. Layer B, white finish (0–200 μ m) containing magnesia lime; there are traces of silicate aggregates and gypsum. Layer C, red-brown in colour, 0–50 μ m thick, containing Sienna, silicate aggregates and calcium-magnesium carbonate mixed in lipoprotein binder or in a mixture of oil and proteinaceous glue, partly altered in calcium oxalate. Layer D, white layer (0–190 μ m) containing calcium-magnesium carbonate and gypsum as a secondary component; there are also traces of proteinaceous substances.

consequently he ordered many modifications, without leaving any scheme or drawings of these variations. Only IRT located them, by visualizing masonry texture: in fact, masonry produced on the site of construction changes made by Cardinal Durini has a regular pattern and is mostly located in the exterior walls of rooms 2.1, 2.2 and 6 (Figs 14 and 15).

DISCUSSION

The results obtained lead to the following conclusions:

- (1) Some building techniques are substantially contemporary: they were employed at the same time, with a short delay, and in the same evolutionary phase of the complex. The bricks and cobbles pattern is located at both the top and bottom of interior masonry walls, and it included bricks and bricks and stone quoins patterns. The use of the bricks and cobbles pattern does not indicate an element of absolute dating in Padana Plain, because it is found recurrently in the historical landscape for many centuries, up to the 1900s. For example, in Figure 7, note that different patterns are seen side by side, without any joint or cut in the masonry. IRT even shows that brick courses are perfectly aligned with cobbles.

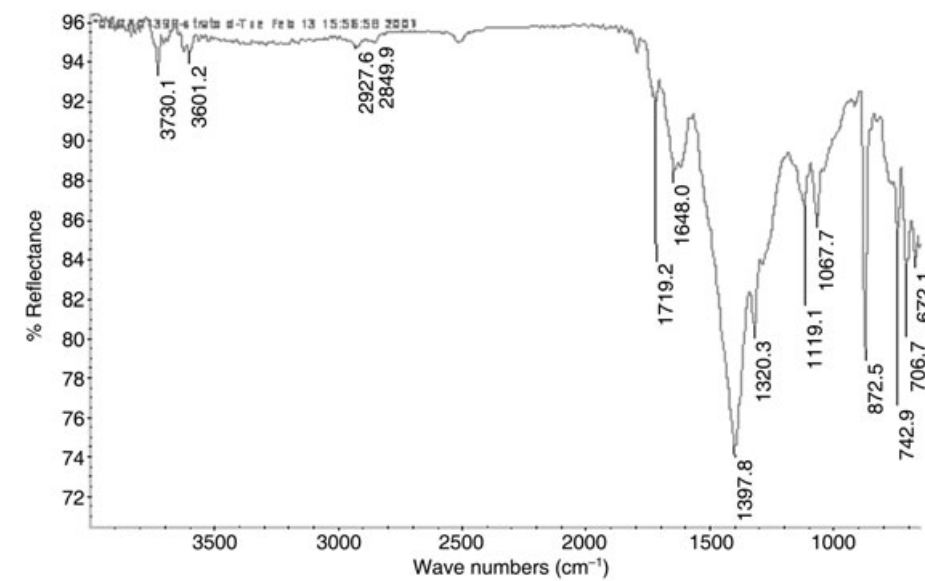


Figure 11 Spectrum FTIR micro ATR modality of the painted strip in room 9. It shows peaks of calcium carbonate (1398 cm^{-1} , 872 cm^{-1}), oxalate absorption (1320 cm^{-1}) and traces of organic substances (2927 cm^{-1} , 2850 cm^{-1} , 1648 cm^{-1}).

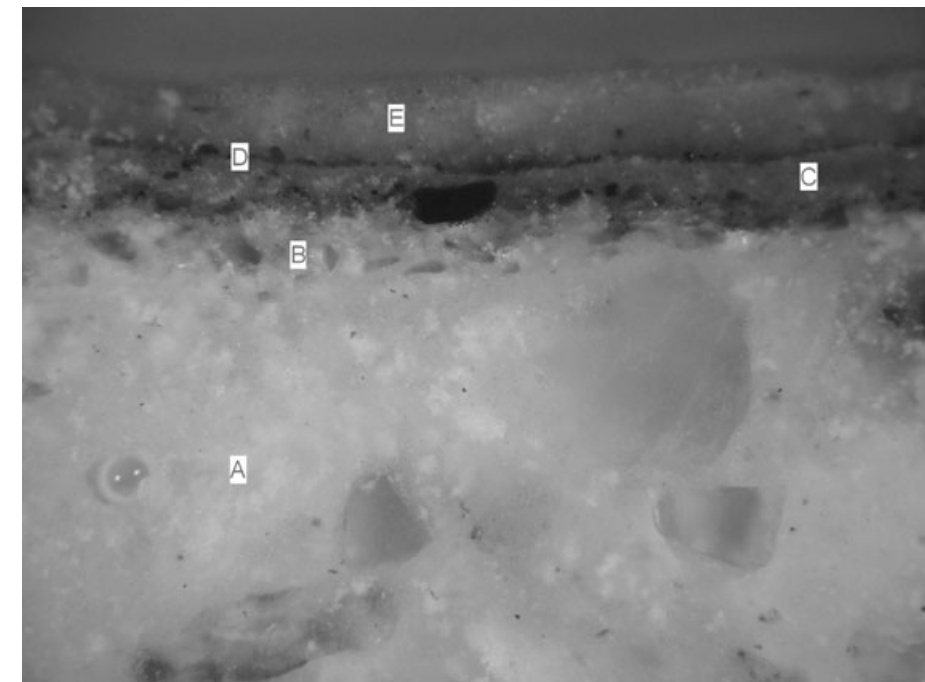


Figure 12 MPOM photomicrography of the painted strip in room 9 (reflected light, cross section N1 / - 240 \times). Layer A is the supporting structure: lime mortar with siliceous sands. The pigments used were smalt (layer B), ochre (layers C and E) and red iron oxide (layer D).

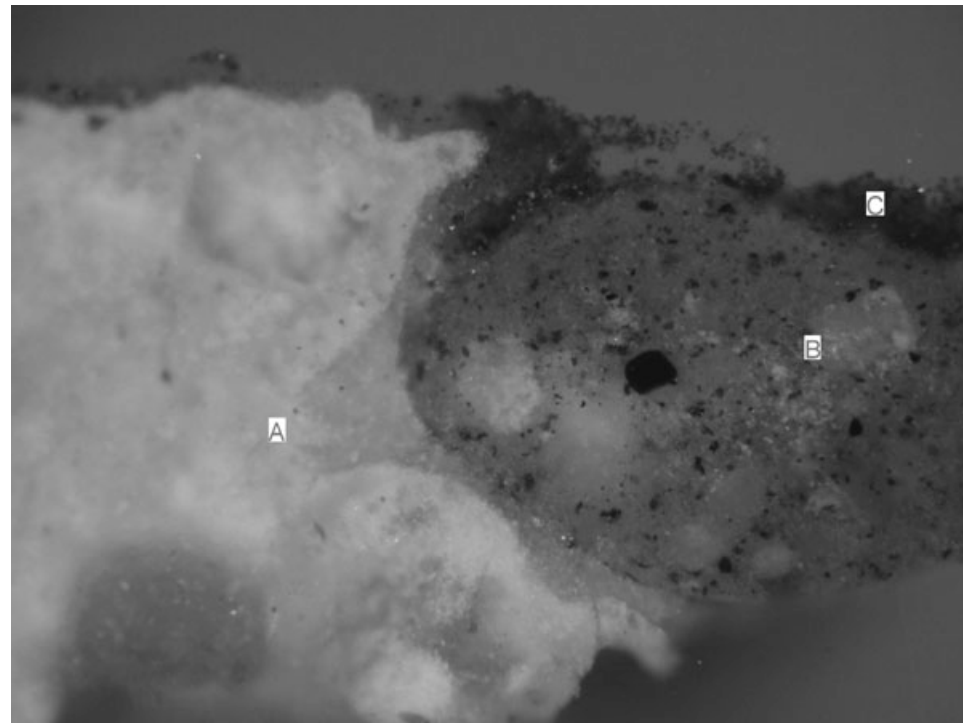


Figure 13 MPOM photomicrography of the lathing vault in room 3 (reflected light, cross section N/1 - 240Y). Layer A is a white plaster containing magnesia lime with silicate aggregates. Layer B is pinkish (30–550 mm thick) containing magnesia carbonated lime and a mixture of ochre and artificial particles of ultramarine blue. Layer C is gypsum and artificial ultramarine blue.

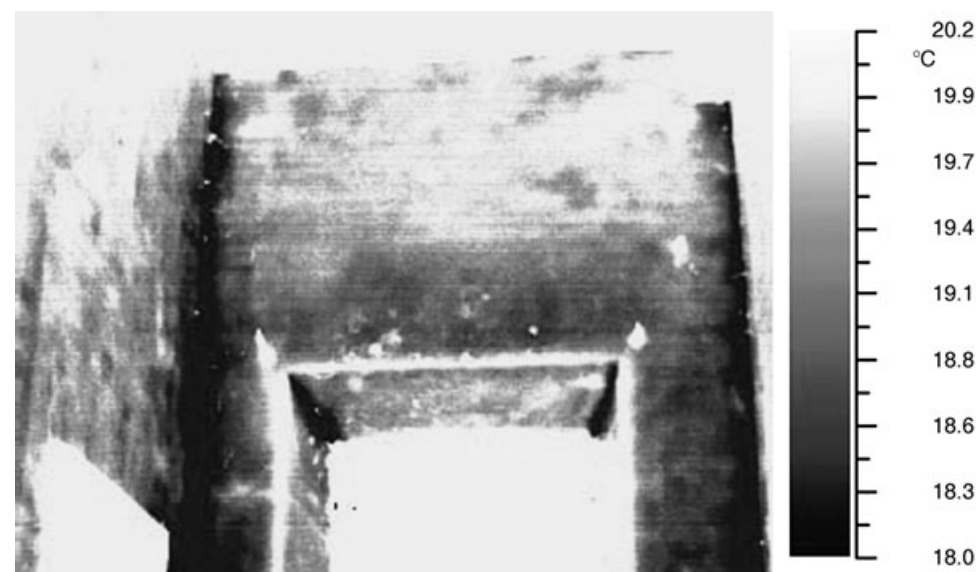


Figure 14 Composite thermograms of the eastern wall of room 6. The texture of the brick wall appeared on infrared imaging.



Figure 15 Composite thermograms of wall 'B', room 5.



Figure 16 The visual state of the southern wall (A) of room 5.

- (2) Problems in IRT application occur when plaster has delaminated from the substrate. In these cases, such as in rooms 3 and 8, the heat flux is interrupted by an air layer. For this reason the temperature distribution of surface is not representative of the inner structure.
- (3) Finally, the location of chimney stacks within masonry enriched knowledge of the buildings: these details are very valuable for structural conditions assessment (Figs 16 and 17).

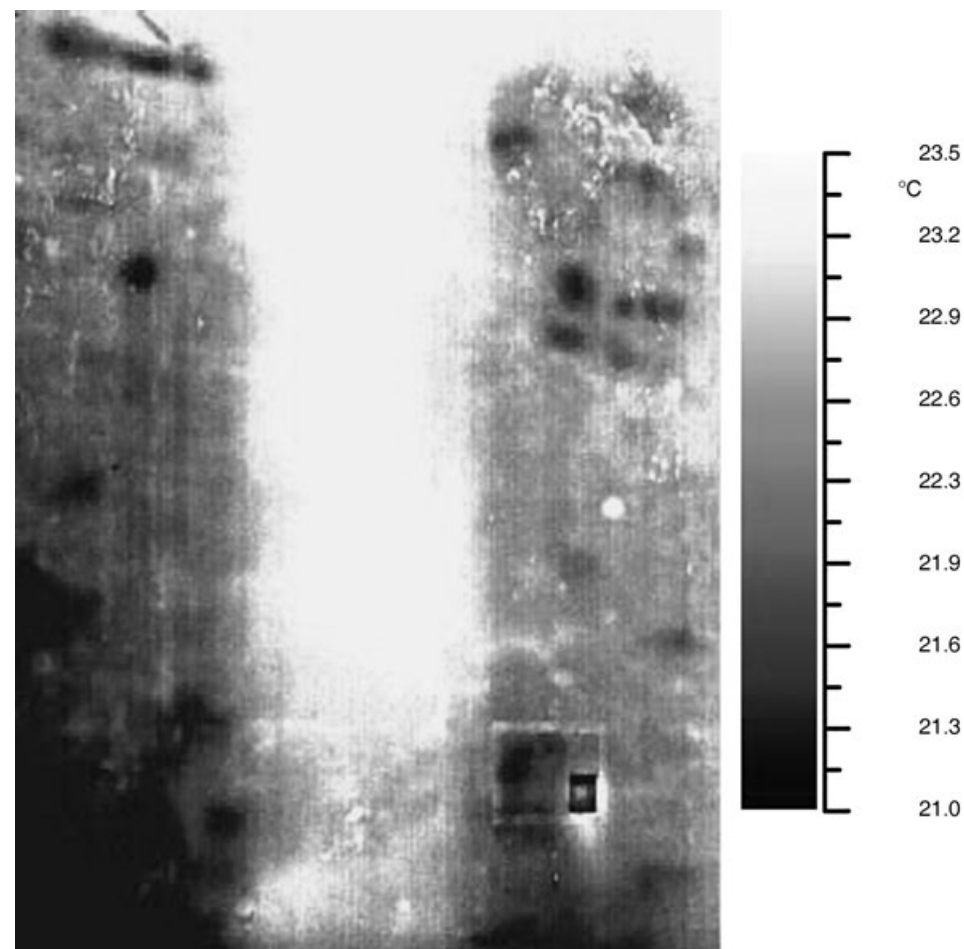


Figure 17 Composite thermograms of the southern wall (A) of room 5. A chimney stack appears on infrared imaging.

CONCLUSIONS

The investigation showed good results in locating different building techniques on the *piano nobile* of Villa Mirabello. Comparing physical data with historical archival documentation confirmed hypotheses about historical evolution of the complex, and located modifications. Information regarding modifications has major importance in structural analysis, especially in structural validation of adaptive reuse projects: for example, location of intrinsic vulnerabilities (such as cracks and openings infilled in rooms 2.1, 2.2 and 6) are critical in protecting the building and its inhabitants. On the other hand, the success of infrared techniques was limited by surfaces where wallpaper and thick coatings were applied, and in general where exterior layers contained materials with high diffusivity. Moreover, not all questions regarding the historical evolution of Villa Mirabello were answered. New steps in our research will be required to investigate other 'enigmas' on the ground level.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank collaborators Elke Di Flumeri (surveyor), Hugo Wilfredo Torres Reyna (architect) and Monza Park Administration, and especially Silvia Corti (architect).

REFERENCES

- Bison, P. G., Grinzato, E., Marinetti, S., and Braggiotti, A., 1998, Fresco thermographic inspection by convective heating technique, in *Review of progress in quantitative non-destructive evaluation*, vol. 17 (eds D. O. Thompson and D. E. Chimenti), 1769–76, Plenum Press, New York.
- Bison, P., Dezzi Bardeschi, M., Grinzato, E., Kauppinen, T., Rosina, E., and Tucci, G., 1996, Infrared thermal scanning as a methodology for survey of Facades Palazzo della Ragione, Milan, Italy, in *Thermosense XVIII, Proceedings of SPIE*, Orlando, USA.
- Di Bella, L., and Lazzaroni, L., 2004, *Villa Mirabello a Monza: vicende storiche e modelli d'uso delle prime fasi, 1652–1806*, Laurea dissertation, chair Prof. S. Della Torre, Politecnico di Milano.
- Di Bella L., and Lazzaroni L., 2006, Villa Mirabello, in *Le Ville Mirabello e Mirabellino nel Parco Reale di Monza*, 49–73, Silvana editoriale, Italy.
- Grinzato, E., Vavilov, V., and Kauppinen, T., 1998, Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, **29**(1), 1–9.
- Grinzato, E., Bison, P. G., Marinetti, S., and Vavilov, V., 1994, Non-destructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography, *Research in Nondestructive Evaluation*, **5**, 257–71.
- Grinzato, E., Vavilov, V., Bison, P. G., Marinetti, S., and Bressan, C., 1995a, Methodology of processing experimental data in transient thermal NDT, in *Thermosense XVII Proceedings of SPIE*, Orlando, USA, 167–78.
- Grinzato, E., Bison, P. G., Bressan, C., Mazzoldi, A., Danti, C., and Vavilov, V., 1995b, Thermal testing of delaminations in painted facades, in *Proceedings of the workshop on 'Advanced infrared technology and applications'*, Capri (Italy), 273–88, Atti della Fondazione Giorgio Ronchi, Firenze.
- Grinzato, E., Vavilov, V., Grimoldi, A., Rosina, E., Di Flumeri, E., Papetti, V., and Roche, G., 2001, Capturing the building history by quantitative IR Thermography, in *Third international congress on 'Science and technology for the safeguard of cultural heritage in the Mediterranean Basin'*, Alcalá de Henares, Spain.
- Ludwig, N., and Rosina, E., 1998, Heat transfer models for detecting deep structures in masonry, in *Proceedings of the fourth international workshop on advanced infrared technology and applications*, vols 1–3, 367–78, CNR-IROE, Florence.
- Ludwig, N., and Rosina, E., 2005, Dynamic IRT for the frescoes assessment, the study case of Danza Macabra in Clusone (Italy), in *Thermosense XXVII, Proceedings of SPIE*, Orlando, USA.
- Rosina, E., and Grinzato G., 2001, Infrared and thermal testing for conservation of historic buildings, *Materials Evaluation*, **59**(8), 942–54.
- Sansonetti, A., Bugini, R., Rampazzi, L., Della Torre, S., Segattini, R., and Rosina, E., 2003, Merging of NDT for stucco analysis: the study case of S. Abbondio in Como (Italy), *Materials Evaluation*, **61**(5), 604–10.
- Schirripa Spagnolo, G., Guattari, G., Grinzato, E., Bison, P. G., Paoletti, D., and Ambrosini, D., 1999, Frescoes diagnostics by electro-optic holography and infrared thermography, in *Sixth world conference on NDT and micro-analysis in diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage*, Rome.
- Schuller, M., 2003, Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures, *Progress in Structural Engineering and Materials*, **5**(4), (online publication).

- Spanò, A., Volinia, M., and Girotto, M. 2005, Spatial data and temperature: a relationship to deepen. Integrated methods for advanced architectural diagnosis and metric documentation, in *Proceedings of the eighth international conference on 'Non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of the cultural and enviromental heritage'*, Lecce (CD-ROM).
- Vavilov, V., Bison, P. G., Bressan, C., Grinzato, E., and Marinetti, S., 1992, Some new ideas in dynamic thermal tomography, in *Proceedings of the Eurotherm Seminar 27 'Quantitative infrared thermography – QIRT 92'*, Chatenay-Malabry (France), 259–65.
- Vavilov, V., Kourtenkov, D. G., Grinzato, E., Bison, P. G., Marinetti, S., and Bressan, C., 1994, Inversion of experimental data and thermal tomography using Thermo.Heat and Termidge software, in *Proceedings of the Eurotherm Seminar 42 – QIRT 94*, Sorrento, Italy, 273–8.
- Volinia, M., 2000, Integration of qualitative and quantitative infrared surveys to study the plaster conditions of Valentino Castle, in *Thermosense XXII, Proceedings of SPIE*, Orlando, USA, 324–34.

4. KARST SOIL AND RISING DAMP IN SASSARI: GUIDE LINES FOR RESTORATION OF CANOPOLENO COMPLEX

Stefano Gizzi (1), Daniela Scudino (1), Stefano Della Torre (2), Elisabetta Rosina (2), Massimo Valentini (3)

(1) *Soprintendenza ai Beni Architettonici ed il Paesaggio delle Province di Sassari e Nuoro (IT)*; (2) *Politecnico di Milano (IT), Dipartimento BEST*; (3) *Politecnico di Milano (IT), Dipartimento di Energetica*

Introduction

Collaboration between *Soprintendenza per i Beni Architettonici ed il Paesaggio delle Province di Sassari e Nuoro* and *BEST Dept.-Polytechnic of Milano* has focused on critical and historical research and investigation on the prominent architecture of “Canopoleno” complex.

Building of Canopoleno began between 16th and early 17th century; firstly it was “Jesuit *Casa Professa*” (ended in 1611), and later became one of the four original sites of the Order; at last, it was reused as new site of University (*Colegio Nuevo*). Between 18th and 19th centuries major modification occurred, above all inside the building, due to the change of uses (seminar, college, high school).

Original features are perfectly recognizable nowadays. Archive documentation shows that from the start, rising damp was a recurrent issue, due to bad quality of local stone (called “*pietra spugna*”, sponge stone) and local geological morphology. Sassari location is inside Nurra Region, which is a large plain with a karst soil and it consists of springs, sinkholes, caves, karren fields, layers of outcropping rock with discontinuous and thin soils [1]. Due to karst phenomenon, before ice age many large and caves pierced the coast as well as the land soil. Because of such conformation, the land of the city of Sassari is rich of water also thanks to the fact that, in the past, people were used to collect rainwater was from roves of buildings by gutter pipes, which were connected with excavated or natural collection basins in the soil. These basins are still under the foundation of buildings, filled by rain which filters across the soil. The claim found in archive documentation regards Canopoleno complex and generally, the whole historic center fabric. Rising damp remains main problem, up to now, although *Ministero per i Beni e le Attività Culturali* has directly managed complete restoration, which started in 1999.

Paper hosts results of studies and investigation performed by Polytechnic of Milano in the last three years, in order to find out the causes of damage and solutions for best re-using this important piece of historic urban fabric.

Historical overview

As structural in Sassari’s urban fabric of historic center, Canopoleno is a significant part of Jesuit counter-reformation architecture, which had a “delayed” diffusion in Sardinia (fig. 1). From their arrival in Sassari, Jesuits inhabited an old building owned by Montanyans family.

Between the end of 16th and beginning of 17th century, Jesuits built *Colegio Nuevo* (nowadays it is University site), in front of Montanyans’s building. In the area of the ancient Montanyans’s house, between 1580 and 1607 they built the Church of Jesus and St. Mary’s, and later their *Casa Professa* (mansion for priest and pilgrims).

Casa Professa was ended in 1611. Probably, some Jesuit architects contributed to buildings: G. Tristano, D. Verdina and especially G. De Rosis among them, contributed to definitive project. At that time, Jesuit professionals took the habit to travel between Spain and Italy to build most important Order sites up [2,3].

Canopoleno complex was set next to medieval Montanyans’s house. From the beginning it showed damages due to rising damp, bad quality of local stone (called “*pietra spugna*”, sponge stone) and karst soil. The building was mostly built with three kinds of local calcarenite: a white kind (high mechanical performances, low water adsorption), a greysh one (medium mechanical performance, medium-low

water adsorption) and a yellow one, “*pietra spugna*”, which has a very high water adsorption capability. Quoins are set with a casual pattern inside the masonry.

Refurbishments occurred in 17-18th Centuries regarded an enlargement, the addition of a new floor, and subdivision of interior. Further modifications were caused by separating College (at second floor) from high school (at first and ground floor).



Leaving aside modifications, nowadays we can clearly distinguish original plant: a “C”-shaped plant, in which vaulted halls are set along a central aisle, and an elegant facade.

Figure 2 - Canopoleno complex in Sassari, 2005

In 20th century neglect caused major damage: roof collapsed, window frames were torn away, rising damp increased. Damage got worse until *Ministero per i Beni e le Attività Culturali* directly took management of the building in 1998, and in 1999 restoration began, to devote building to city picture gallery.

Restoration of last decade did not completely solve moisture issue (even though an electro-physic system was installed), because of the presence of many holes, pits, springs and ponds underground.

Methods

Authors used visual analysis of materials, assessment of damage in the building and in most of nearby ones, historic chronology of major modification occurred in time to assume damage’s causes, which resulted: rising damp, localized infiltration from sewerage and hydric system, spread rain waters, high Relative Humidity, different hygroscopical properties of the coating materials. Research aims to evaluation of the impact of episodic rising damp on historic buildings, due to scattered infiltrations and karst soil. Monitoring water content in stone masonry and its distribution allowed to evaluate ways of water coming in masonry and water content, treatment for drying moisture, and, at last, design guidelines for restoration and re-use of the building (despite of the uneliminable presence of water).

Measurement were taken during three beatings, on April and October 2005 and October 2006.

Diagnostics focused on:

- 1) A preliminary inspection by IR Thermography (IRT), that allowed to map colder areas of most damaged surfaces (ground floor and cellar, interior and exterior) [4].
- 2) Within these zones, samples were collected to measure water content, at different heights (along vertical rows) and distances from the masonry’s surface (according to UNI 11085 “Beni culturali. Materiali lapidei naturali ed artificiali. Determinazione del contenuto di acqua: Metodo ponderale”).

Moreover, a new method of monitoring was applied: *Fixed Points Method* (PPM) [5].

Fixed Points Method

Gravimetric test performed in Canopoleno, has been precise and reliable, nevertheless method keeps some contras:

- requires samples (few grams) of the materials under investigation, therefore it is minimally invasive;
- destructivity increases at any repetition of test, because new samples are required for each measurement;
- repetitions of sampling could collect different materials, because of high non homogeneity of masonry materials. In the case of Canopoleno, variability of materials is very high, although samples were collected in small and very close areas. Above all, samples coming from the inner layer of masonry were collected without visual inspection supplying the choice of quoin; most of samples have different porosimetric characteristics, and consequently their water absorption is different although water source is equal. Masonry's non homogeneity risks to invalid repetitiveness of test and comparison of results obtained in the same place at different time.

To overcome listed contras, PPM has been developed.

First step of monitoring consists in operators drilling masonry to set brick cylinders in it (fig. 2). These small cylinders (4 cm long, 0.8 cm wide) have steady full tested properties (porosity, components, etc). They reach thermo-hygrometrical balance with masonry, by sealing masonry's holes. Cylinders absorb water proportionally to water content of masonry. Operators monitor water content by removing wet cylinders, weighting them and substituting them with dry ones. Since measures are taken from the same hole in time, they are not affected by non homogeneity of materials, therefore monitoring time can be extended without any destructive collection of new samples.

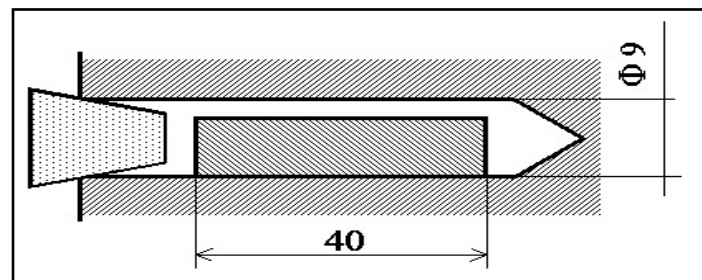


Figure 2 – Sketch and dimensions of brick small cylinder and its location inside masonry hole

Because of different water absorption of masonry and brick cylinders, water content of brick is proportional to water content of masonry; therefore results of PPM give only a qualitative indication of moisture content in masonry. In Canopoleno study case, high variability of materials increases difficulty of comparison between water content in masonry and in brick cylinders [6]

That is why operators chose only some points for PPM measurements, instead of repeating measures on the whole complex; results of thermo-hygrometrical tests performed in 2005, gave the location of samples containing higher percentage of water, and PPM was applied only in those areas.

During first measurements on April 2005, operators drilled masonry to collect gravimetric tests samples. On October 2005, brick cylinders were located in the holes previously drilled in masonry.

Substitutions of cylinder were performed on February, May and October 2006

Substitution consisted on:

- extraction of wet cylinders from masonry;
- putting them into glass test-tubes;
- sealing tube-test;
- relocation of new cylinder;
- sealing the holes with plasticine;
- transportation of the tube test onto laboratory;

- weighting (PU);
- drying them at 105°C until steady bulk reaching constant weight;
- weighting dried ones (PS).

Cylinders water content was obtained by

$$\text{Water content [\%]} = \frac{PU - PS}{PS} \times 100$$

3) Five RH/T probes have been performing microclimatic monitoring, one hour of recording rate: probes are set at ground floor, in Canopoleno cellar, and in Palazzo Ducale cellar (Palazzo Ducale is the city hall, built in 18th century, opposite to Canopoleno entrance). Measures performed in Palazzo Ducale, after restoration, are reference for Canopoleno.

Results

1) To verify rising damp hypothesis, authors firstly observed damage distribution and later used IRT to map colder areas. Investigation was performed at ground floor (inside and outside the building) and in the cellar. In colder areas, operators collected few samples of stones and plaster at different heights from the floor, according to steady procedures [7, 8, 9]. The surface temperature map allowed to correlate colder areas and evaporation flux, due to presence of water. Gravimetric tests allow to measure water content in samples.



Figure 3 - Ground floor, room 21

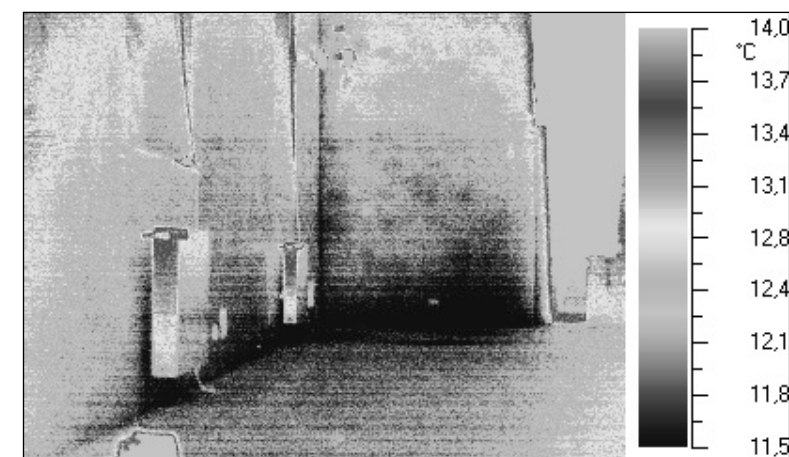


Figure 4 - Ground floor, room 21, thermogram of left side

Figure 4 shows IRT application for moisture detection in room 21's left side. Thermal gradient is around 1°C between floor and 1.2 m high. Gravimetric tests have been performed on this side too. Results are: average water content of a tufo sample is 4.8% (20 cm up to the floor in the black area). At a upper level, 60 cm from the floor, water content is lower 3.8. Repetitions of

test in spring and next fall had same results. Therefore, thermal gradient and water content distribution indicate the presence of a infiltration at the basis of left wall.

Authors drew a map to correlate and localize results of gravimetric tests performed in 2005 and 2006. Different colors represent average variation of water content between beatings: at least an increasing value among the row, light grey; decreasing value of average water content in the row, grey; no variation, black.

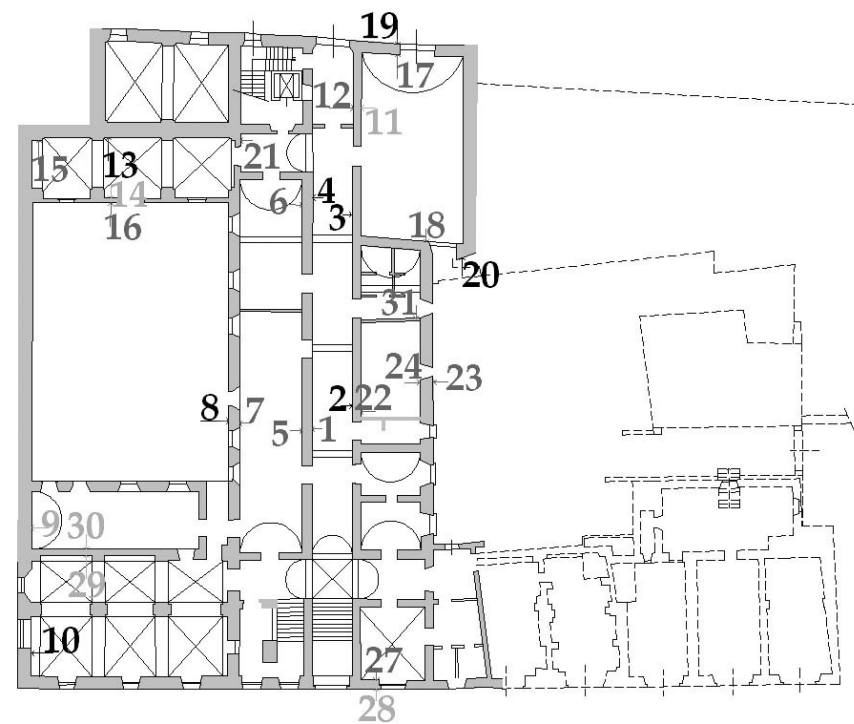


Figure 5 - Ground floor, location of the samples row (1-29) and average variation of water content in 2005-2006 measurements

Many rows (13) are grey, because most of them are due to highly humid samples placed at the basis of masonry. Nevertheless, many samples have an increase of water content (6 alignment). In other 6 alignments operators measured no changes. Collected data show a very discontinuous trend, due to random location of different stones in masonry, and irregular distribution of infiltration.

Non homogeneity of masonry affected results, especially those samples collected inside the structure. In fact, it was possible to collect the same material on the surface, because of visual analysis, but it was not possible to choose materials at 15-20 cm inside the stone.

Therefore, authors calculated average values between surface and deep samples, for each point of measurement, and qualitatively considered average values.

Authors achieved a quantitative evaluation by comparing data and graphics of each beating, point by point.

Following graphics show in details variation of average water content of surface and samples collected at 15-20 cm inside.

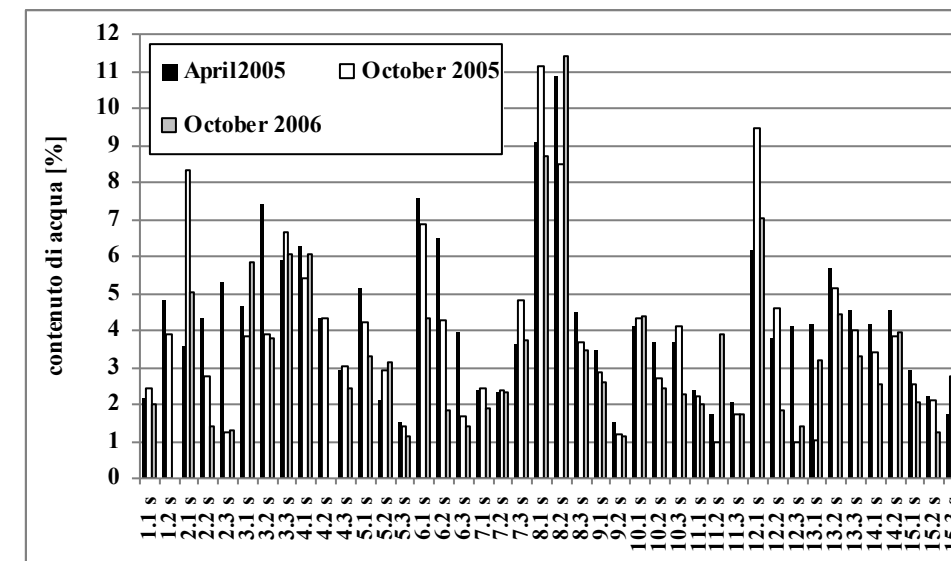


Figure 6 - Water content of samples 1.1/ 15.3. Samples are numbered with two figures: first means row, and second means height (around 20 cm, 60 and 80 from the floor)

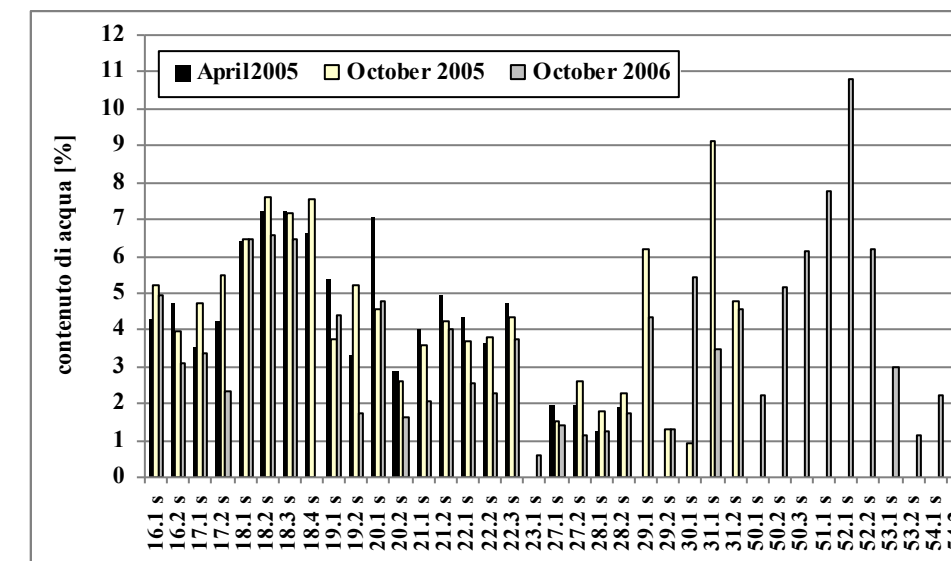


Figure 7 - Water content of samples 16.1/ 54.2. Samples are numbered with two figures: first means row, and second means height (around 20 cm, 60 and 80 from the floor)

October 2006 measurements have lower values of average water content, especially at the basis of masonry, but it is anyway high.

Moreover, in many samples water content increased. These samples are:

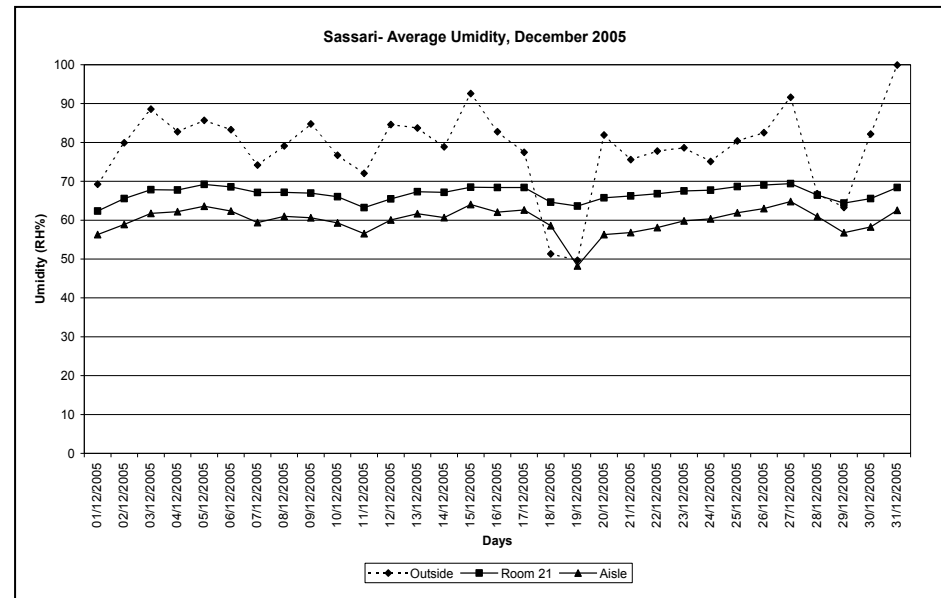
3.1, 8.2, 4.1, 7.1, 9.1, 18.2, 19.1, 20.1, 8.2, 11.2, 13.2, 2.3.

Resulted discontinuous trend of water content variation is due to non homogeneity of materials, variability of their absorption capability, and irregular distribution of infiltration. Moreover, resulted values are very high, above all in samples

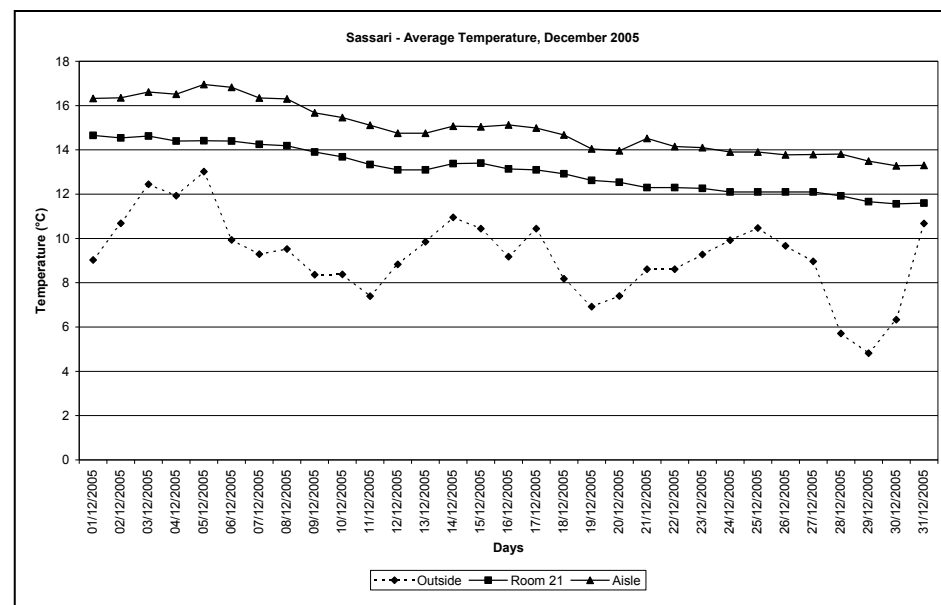
2.1, 8.1, 12.1, 16.1, 18.1, 50.1, 51.1, 8.2, 18.2, 52.2, 4.3, 18.3, 50.3.

The increase of water content is caused by rising damp, which is localized in many areas of plant. In addition, localized smaller infiltrations cause increase of water content in room 13, and rooms aligned along Via Santa Caterina, at cellar floor.

2) Operators installed four probes to monitor thermo.hygrometrical variation of microclimate in cellar and ground floor (rate of registration is one/hour). Moreover, a fifth probe has been placed in Palazzo



intervention and gave reference values for ambient condition.



Ducale cellar. The historic building is set in front of Canopoleno; it has similar building techniques, and same materials. Rising damp was one of major cause of its damage. It already went under restoration and professionals restored plaster of cellar and ground floor by white washing. Moreover they ensures a continuous ventilation in the cellar, in order to decrease RH. Therefore, Palazzo Ducale's microclimate monitoring constituted a study case for

Figure 8 - Graphics of average daily values of T°C and RH on December 2005

Discussion

Results lead to the following points:

- Masonry components are different kinds of *calcarenite* stone: their water absorption function are

highly differentiated

- Each kind of *calcarenite* stones, has a different evaporation time of water content, even at the same ambient conditions
- Water content is not steady but values are always high
- Moist masonry is within 60 cm up from the floor, only in few points moisture has higher distribution (due to the addition of localized minor infiltrations)
- Rising damp affects many walls; lower water contents are only in limited masonry. Seldom some part of structures resulted dry, but the building has episodic infiltration all over.

From these points comes that major cause of rising damp mainly depends on soil geology, without any possibility to intercept infiltration or collect water. Moreover, so differenced stones characteristics of absorption advise against any effective chemical barrier.

At last, even the experimental of electro-physic method for water's way out from structures, did not have satisfactory results. Humidity causes stones damage (surface pulverization, without large lacks or delamination of stones) because of presence of salts in *calcarenite* (nitrates and sulfates resulted from ionic chromatography). The last measurements by IRT and gravimetric tests allowed to pinpoint the positive effects of coating removal: thermal images showed a reduced extension of the areas where major evaporation flux occurs. Test results indicate that continuous evaporation will completely damage plaster, and in the meantime, presence of coating slows down drying process in masonry.

Indications coming from analysis results are that alternative solutions to the present plaster are white-washing or macroporous plaster. Both of them require programs of frequent maintenance. Contra is that continuous evaporation on surface will increases RH, which resulted already high at any time. An alternative solution can be suggested for a better re-use of rooms: ventilated counter-walls could supply undamaged surfaces for exhibition, and in the meantime they can decrease evaporation on stone surface.

Conclusions

Presented method for rising damp diagnostic resulted helpful to assess and detect decay's causes. Karst soil vanify most of intervention meant to prevent rising damp, such as chemical barrier, electrophysical methods and perimetral deadspaces. In fact chemical barrier application could have high contras in such a case. Differences of absorption could prevent a homogeneous spreading of products inside masonry. On the other side, the application of electrophysical method did not great results until now. Design of building use has to take into account thermal-hygrometrical characteristics of masonry, in order to find out best use compatible with authors's suggestion for facing rising damp damage.

Specifically a further microclimatic monitoring will be very useful to control ambient condition both during restoration yard and visitors attendance.

[1] A.F.Fadda, L'evoluzione del paesaggio in Sardegna, Co.Edi.Sar. Cagliari 1990

[2] *Arte e cultura del '600 e del '700 in Sardegna*. Proceedings of National conference, ed. T.K. Kirova, Napoli, Edizioni Scientifiche Italiane, 1984

[3] R. Wittkower, I. B. Jaffe, J. S. Ackerman, H. Hibbard, F. Haskell, R. Taylor, P. Bjurström, T. Culley, *Architettura e arte dei Gesuiti*, Electa ed., Milano, 2004

[4] E. Rosina, N. Ludwig, L. Rosi, *Optimal Conditions to Detect Moisture in Ancient Buildings. Study Cases from Northern Italy*, Thermosense XX, Orlando (USA) 1998, SPIE proceedings vol 3361, ed. SPIE WA(USA), pp. 188-199

[5] Valentini M., *Prime verifiche su murature in laterizio di una metodologia poco invasiva per la determinazione del contenuto di acqua*, Convegno nazionale "Architetture e manufatti del cotto. Approfondimenti di storia e cultura materiale, Palazzo dei Diamanti, Ferrara, 14-15 novembre 2005

[6] Valentini M., *Una metodologia poco invasiva per la misura del contenuto di acqua delle murature*, Workshop "Monitoraggio e conservazione programmata", Venaria Reale, Torino, 25 novembre 2005, Kermes quaderni-Nardini e., pp. 168-173

[7] N. Ludwig, E. Rosina, *Active and Passive thermography to detect moisture in building materials*, Proceedings of 5th AITA, International Workshop on "Advanced Infrared Technology and Applications", CNR ed., Venezia 1999, pp. 166-175

[8] E. Rosina, N. Ludwig, *Optimal thermographic procedures for moisture analysis in buildings materials*, Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications 1999, Munich, Germania, SPIE proceedings vol. 3827, SPIE ed., WA (USA)

[9] G. Cruciani Fabozzi, E. Rosina, M. Valentini, *Thermography and gravimetric tests in moisture analysis*, proceedings of 20° workshop on "Metodi chimici, fisici e biologici per la salvaguardia dei Beni Culturali, AICAT, GICAT, Università La sapienza di Roma, Abaco ed., Rome 1998

5. EFFETTI DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE DELLA PAVIMENTAZIONE SUL DEGRADO DEI RIVESTIMENTI E SUL MICROCLIMA

Valeria Pracchi, Elisabetta Rosina Politecnico di Milano, Dipartimento BEST

ABSTRACT

Thermal anomalies of surfaces imply risk factors for their conservation at severe ambient condition (high RH and low air temperature), without HVAC system.

Evaluation of thermal unbalance of the surface, has to take in account daily and seasonal climatic variations, because of their affection on the microclimate inside the building. Monitoring is the best practice for measuring such variations and their effects on structures.

Temperature of paving affects temperature distribution at the basis of masonry: without this contact, different materials of masonry and their location over the ground should ensure a higher temperature distribution than the floor's one. Moreover, also the air layers, near to the colder paving, have a lower temperature and this affects temperature distribution of the air layers, increasing the elevation.

The paper describes testing procedures for verifying thermal unbalance of surfaces, and the evaluation of real condition of risk for damage.

KEY – WORDS

Condensation, evaporation, plaster, masonry, paving, cold side, RH, air Temperature

Introduzione

In ambienti non climatizzati, in condizioni climatiche severe (basse temperature ed elevata umidità) la presenza di superfici che presentano anomalie termiche implica fattori di rischio per la conservazione delle loro finiture.

Nel caso di pavimentazioni, senza intercapedini o vespai, la temperatura del terreno influenza direttamente la temperatura superficiale di tali rivestimenti. Durante l'inverno, e soprattutto nelle stagioni intermedie, quando si verifica un elevato gradiente termico tra la temperatura della superficie e quella ambientale, nonché un elevato incremento dell'umidità ambientale, si assiste ricorrentemente alla condensazione di vapor acqueo, e, in fase di evaporazione, alla ricristallizzazione dei sali. Pertanto si genera un degrado differenziale su quelle aree della pavimentazione che costituiscono le superfici preferenziali per la condensazione. La temperatura delle pavimentazioni influenza anche quella delle murature direttamente a contatto, e quindi la base di pareti che, essendo costituite da materiali differenti, e non essendo controterra, avrebbero una temperatura media superiore a quella della pavimentazione.

Tuttavia, per conduzione, si registra un graduale decremento delle temperature superficiali che genera degrado delle finiture (intonaci, lapidei naturali ed artificiali) e, che, per distribuzione e localizzazione potrebbe essere facilmente associato a umidità di risalita.

Le caratteristiche igroscopiche dei materiali di finitura giocano un ruolo molto importante nella comparsa del degrado, a parità di condizioni al contorno, ed alcuni studi sono già stati condotti per individuare i fattori principali del processo di degrado [1, 2].

Ovviamente gli interventi risolutivi sono molto diversi nel caso di umidità per condensazione e per risalita, e diventa pertanto cruciale la corretta diagnosi: l'integrazione di termografia all'infrarosso, per la determinazione dei gradienti termici superficiali, di prove gravimetriche e del monitoraggio ambientale consentono di discernere le differenti cause di degrado. Particolare rilievo acquista l'indagine, nel caso di pavimentazioni di pregio e storiche, e quindi nel processo decisionale per la conservazione materica, sostanziale, delle superfici. Non da ultimo, la mappatura delle temperature superficiali di pavimentazioni e murature, consente di individuare le zone critiche a valle del restauro, e quindi di progettare un adeguato piano di conservazione programmata.

Gli autori sottolineano che, tra le superfici meno indagate dal punto di vista termo – igrometrico, si segnalano proprio le pavimentazioni. A differenza di analisi conoscitive di altra natura vi è una mancanza quasi assoluta di studi che considerano le pavimentazioni come elemento fondamentale per l'equilibrio termico in ambienti antichi, indice di una scarsa considerazione sistemica dei processi che interessano l'architettura.

Metodi e procedure

Uno dei testi che a tutt'oggi rimane attendibile, esaustivo, e chiaro è il saggio di Giovanni e Ippolito Massari, in cui, a proposito delle “pareti fredde”, si legge:

“Il fenomeno fisico della condensazione nasce sempre da un dislivello termico tra l'aria ed una superficie muraria, la cosiddetta parete fredda. Occorre misurare le temperature superficiali delle varie strutture: pareti, pavimento e soffitto, alla ricerca della parete fredda, grazie a termometri sensibili alle basse temperature, privi di inerzia da entrare in equilibrio istantaneamente con la superficie da misurare (termometri ottici a coppia termoelettrica che captano a distanza i raggi infrarossi emessi da un corpo e, senza toccarlo con lo strumento, ne danno le temperature, [o, meglio ancora, sostengono gli autori, che non necessitano neppure di essere vicini (termografia all'infrarosso), n.d.a.]. [...] l'indagine ottica può stabilire con certezza che la temperatura pericolosa è quella della superficie del pavimento, o di una parte del pavimento per esempio, ed i provvedimenti difensivi saranno studiati e limitati alla sola superficie pericolosa. Infatti l'aria ambientale è portata a saturazione dalla sottrazione di calore operata da quel pavimento, in quanto quella è la struttura più fredda di tutta la chiesa, salvo poi al vapore di depositarsi quando è in eccesso anche sulle pareti.” [3, pp. 263-264],

L'ipotesi di Giovanni e Ippolito Massari, come esposta nel testo dell'85, è stata verificata sperimentalmente dagli autori, mediante procedure di prova speditive che possono essere impiegate tanto nelle analisi preliminari al progetto di conservazione, tanto nei controlli periodici indicati dal piano di conservazione programmata, tanto nel controllo e collaudo degli interventi di restauro, soprattutto nella messa a regime degli impianti di riscaldamento e deumidificazione, compresi nella fase di riabilitazione e riuso dell'edificio. Nell'esperienza degli autori, il punto cruciale della diagnostica della “parete fredda” consiste nella misura della temperatura superficiale, in modo estensivo ed accurato, all'equilibrio con l'ambiente, e soprattutto al variare delle condizioni climatiche.

La procedura di prova perciò, ha le caratteristiche di un monitoraggio, un controllo nel tempo, per poter cogliere le eventuali variazioni indotte dalle escursioni termiche diurne/notturne, e dal mutare di temperatura e umidità ambientali nel corso delle stagioni.

La diagnostica suggerita da Massari, basata sulla misura del contenuto d'acqua in profondità (verifica della presenza di umidità d'ossatura ed eventuale identificazione delle vie di adduzione

d'acqua, oppure conferma dell'ipotesi di umidità di condensazione) e sulla localizzazione della “parete fredda”, viene applicata dagli autori mediante l'uso di tecniche termografiche per la mappatura delle zone con temperature superficiali minori, e viene integrata sia con misure gravimetriche, laddove siano state riscontrate anomalie termiche indicative della presenza di infiltrazioni, sia con monitoraggi microclimatici, con registrazione oraria di temperatura e umidità ambientali interne ed esterne all'edificio.

L'elaborazione dei dati ottenuti consente di individuare le zone critiche per il gradiente delle temperature superficiali, e di calcolare anche i tempi di “deriva” propri della struttura, ovvero il tempo necessario affinché le variazioni climatiche esterne producano un cambiamento nel microclima interno. Il tempo di “deriva” è un indicatore fondamentale per la valutazione di elementi insiti nella struttura che impediscano di mantenere costanti le condizioni microclimatiche: come intuibile si tratta spesso delle coperture, ma anche pavimentazioni a contatto con il terreno, o con strutture ipogee.

La procedura di prova è non distruttiva, può essere quindi ripetuta nel tempo, richiede tempi brevi per il controllo in campo anche su superfici estese, e i risultati rilasciano in tempo reale un primo livello di informazioni.

Infine, l'integrazione ulteriore con prove psicrometriche consente di mappare la distribuzione dei umidità e temperatura all'interno dell'edificio, in prossimità delle “pareti fredde” e quindi di verificare gli effetti che tali superfici inducono negli strati d'aria adiacenti.

Caso di studio

Nell'Oratorio dei Santi Caterina e Ambrogio a Solaro, sotto parte della pavimentazione dell'abside esiste un canale di aerazione, le cui uscite sono visibili in facciata e nell'abside. La raccolta della documentazione non permette di identificare dimensioni e profondità di tale canale, che viene perciò localizzato solo il funzione delle sue due uscite. Il pavimento, in lastre di serizzo di posa piuttosto recente (anni '70) lascia supporre la presenza di un massetto in cemento su cui è stato appoggiato il rivestimento lapideo.

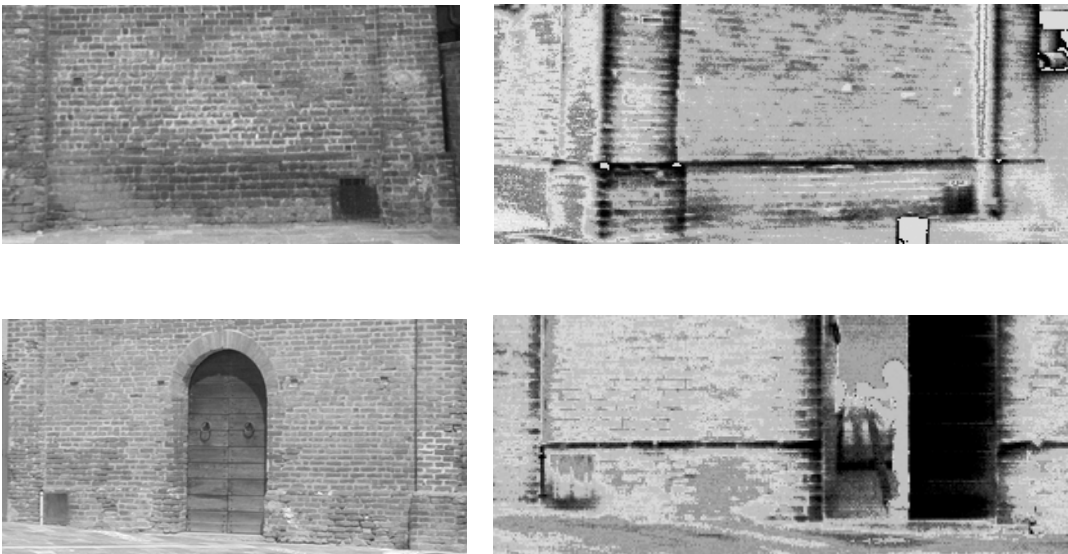
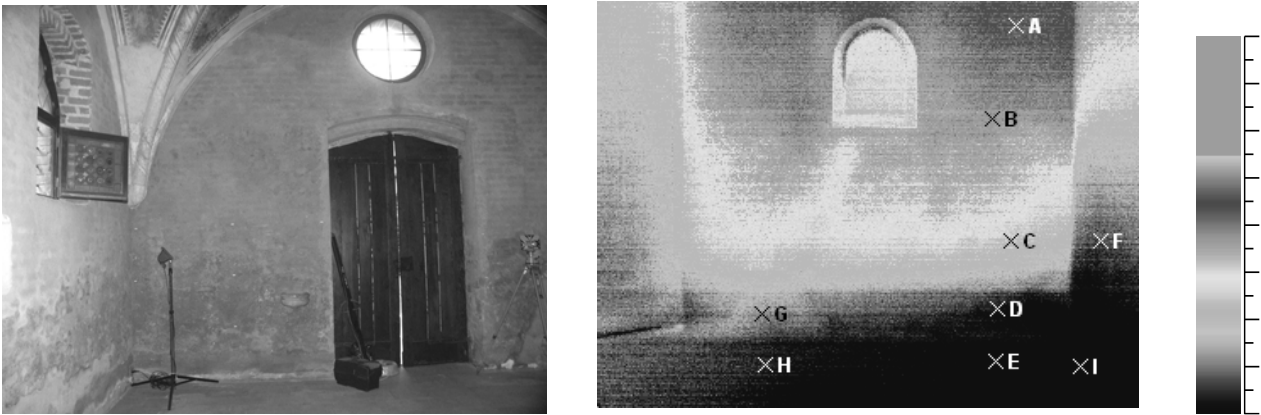


fig. 1-4, Solaro, Oratorio dei Santi Caterina e Ambrogio, facciata e abside (i termogrammi mostrano che il condotto di arerazione non genera gradienti termici, quindi probabilmente la ventilazione, non essendo forzata, non è molto efficace)

All'interno, il rilievo delle temperature superficiali della pavimentazione, effettuato mediante termografia all'infrarosso, presenta una distribuzione molto diversa a seconda delle condizioni ambientali.

A luglio, per elevate temperature ambientali, il gradiente tra le diverse pareti dell'edificio, in funzione della loro orientazione, e la pavimentazione è molto elevato: si noti che la base delle pareti nord ed ovest è alla stessa temperatura della pavimentazione, ed entrambe presentano una temperatura media minore rispetto a quella delle zone oltre 1 m da terra. Sostanzialmente, la pavimentazione si mantiene mediamente più fredda rispetto alla muratura ovest, che viene direttamente irraggiata dalle 12 alle 20 in queste lunghe giornate estive. Alla base della muratura, che è a contatto con la pavimentazione, si rileva un gradiente termico elevato per la trasporto di calore, principalmente mediante conduzione, verso la pavimentazione. Inoltre, la muratura nord, che è inquadrata a destra, è interessata anche da un'infiltrazione localizzata e pertanto la zona più fredda, a causa dell'evaporazione superficiale, è maggiormente estesa (sino a circa 1 m da terra).

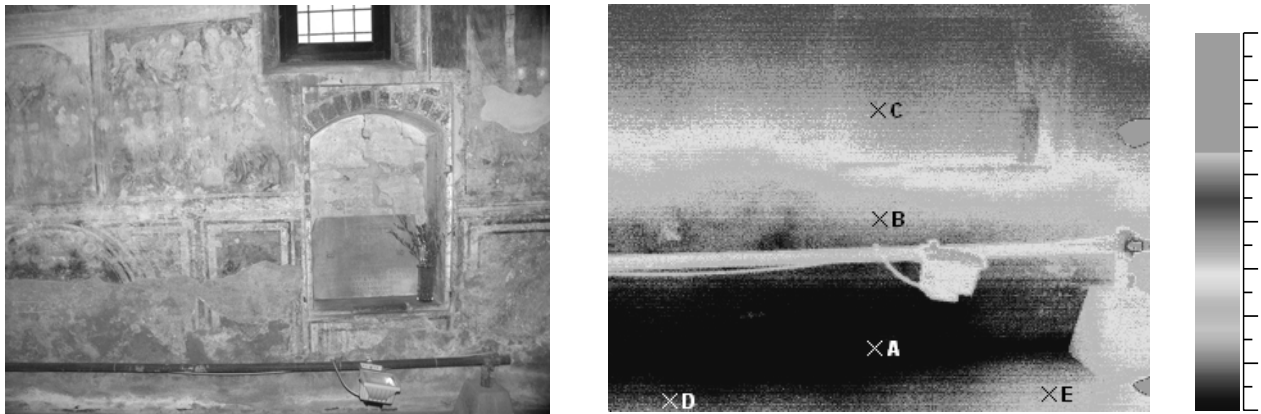


Punto	T °C	Emis.	Ta °C
A	26,3	0,92	26,7
B	26,1	0,92	26,7
C	25,2	0,92	26,7
D	23,9	0,92	26,7
E	23,4	0,92	26,7
F	24,1	0,92	26,7
G	24,4	0,92	26,7
H	24,1	0,92	26,7
I	23,0	0,92	26,7

Fig. 5-6, Solaro, Oratorio dei Santi Caterina e Ambrogio, parete nord dell'abisde controfacciata, parete ovest. Il termogramma inquadra anche una piccola porzione della parete nord (sulla destra). La ripresa è stata effettuata durante la fase iniziale di irraggiamento diretto della parete ovest.

Tab. 1, elenco delle temperature superficiali dei punti A-I localizzati in fig. 6

Fig. 7, 8, Solaro, Oratorio dei Santi Caterina e Ambrogio, parete nord dell'abisde



Punto	T °C	Emis.	Ta °C
A	24,3	0,92	28,2
B	25,7	0,92	28,2
C	27,0	0,92	28,2
D	25,1	0,92	28,2
E	25,8	0,92	28,2

Tab. 2, Solaro, Oratorio dei Santi Caterina e Ambrogio, parete nord dell'abside elenco delle temperature superficiali dei punti A-E localizzati in fig. 8

Confrontando i termogrammi della parete ovest (controfacciata), con quelli dell'abside, lato nord, è evidente una differenza di temperatura della pavimentazione. Nell'abside la distribuzione delle temperature raggiunge valori mediamente più elevati rispetto a quelli che si registrano nella navata. Conseguentemente anche la porzione di muratura a contatto con la pavimentazione ha una temperatura di circa 1.5-2°C più elevata rispetto a quella della controfacciata.

La pavimentazione della navata e dell'abside sono state posate con medesimi materiali e tecnica, le inquadrature dei termogrammi riprendono il lato settentrionale, sia in navata sia nell'abside, nella zone ove si trova il canale. Dal punto di vista della struttura, la principale differenza tra navata e abside, è lo spessore del massetto: l'abside è ad una quota 15 cm superiore rispetto alla navata,

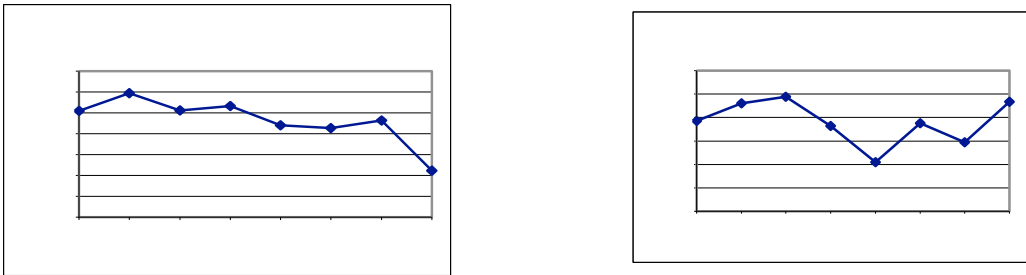
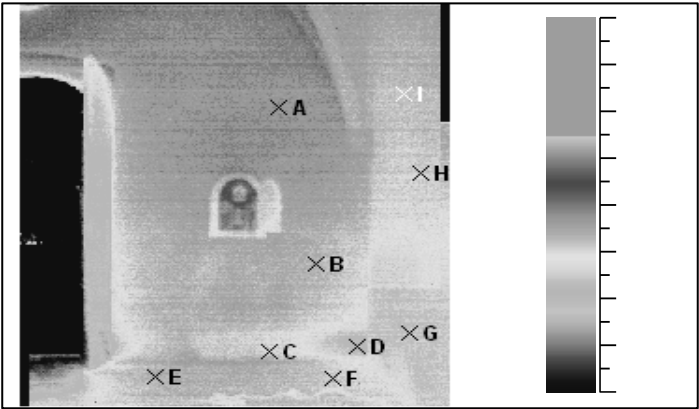


Fig. 9 e 10, grafici dell'andamento medio settimanale di temperatura e UR ambientale, dal 22 luglio al 20 settembre 2004

A settembre, in condizioni ambientali diverse, dopo un'estate molto calda, la parete ha raggiunto l'equilibrio termico con la pavimentazione ed il terreno, la distribuzione delle temperature del pavimento è simile a quella della base della muratura. Si nota la permanenza di una infiltrazione in controfacciata esattamente in corrispondenza dell'ingresso del canale di aerazione.

Alcuni fattori vanno inoltre considerati: anche nella porzione dell'abside che è inquadrata è stata rilevata un'infiltrazione, di estensione paragonabile a quella individuata nella parete nord. A differenza però della parete ovest (controfacciata), questo lato dell'abside non viene mai irraggiato direttamente, e, a peggiorare la situazione, qui vi è stato quasi addossato un edificio. Ciò nonostante, le temperature superficiali sono più elevate rispetto a quelle registrate nella navata. Come nota, occorre ricordare che la temperatura ambientale è andata aumentando nel corso delle riprese, ma il tempo intercorso tra l'inquadratura della parete ovest e dell'abside non supera i 20 minuti, pertanto si può ritenere che la superficie dell'abside sia stata ripresa in condizioni molto simili a quelle di registrazione della parete ovest (controfacciata).

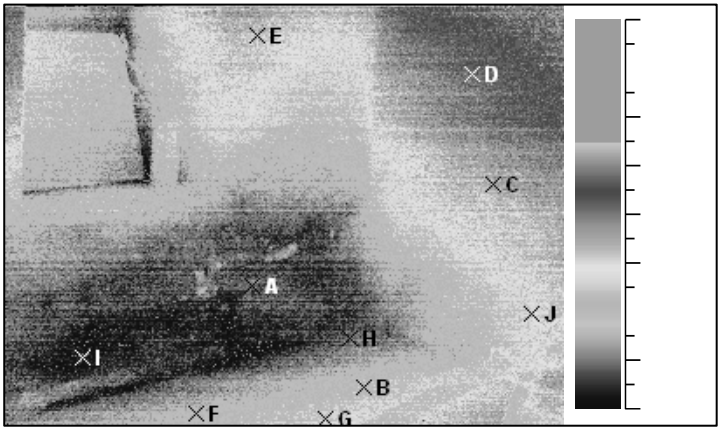
Infine, occorre fare una valutazione, riguardo alle condizioni microclimatiche che si sono generate nei mesi estivi (vedi grafici fig. 9 e 10): per temperature superficiali inferiori di 4-5°C rispetto a quelle ambientali, per UR superiori al 60%, il rischio di condensazione del vapor acqueo è molto elevato.



Punto	T °C	Emis.	Ta °C
A	20,7	0,92	24,6
B	20,4	0,92	24,6
C	19,9	0,92	24,6
D	19,0	0,92	24,6
E	20,2	0,92	24,6
F	20,0	0,92	24,6
G	19,2	0,92	24,6
H	20,0	0,92	24,6
I	20,0	0,92	24,6

Fig. 9, Solaro, Oratorio dei Santi Caterina e Ambrogio, settembre 2004, mosaico dei termogrammi della controfacciata; Tab. 3, temperature dei punti A-I localizzati in fig. 9

Inoltre, la temperatura della parete nord rimane un po' inferiore, alla base, rispetto alla media delle temperature della controfacciata, a causa della mancanza di irraggiamento diretto. Anche nell'abside la distribuzione delle temperatura mostra gradienti meno marcati di quelli rilevati nella precedente battuta. Tuttavia, la presenza dell'infiltrazione, e la conseguente evaporazione della superficie alla base della muratura, provoca un abbassamento della temperatura di circa 1°C che non è imputabile alla pavimentazione: in questo caso la temperatura inferiore della parete tende a raffreddare anche la parte di pavimentazione immediatamente adiacente. Dato il materiale di rivestimento, ceramico, è da ritenere che non siano in atto fenomeni evaporativi sulla superficie del pavimento, e pertanto la zona a minor temperatura è da imputare principalmente alla conduzione.



Punto	T °C	Emis.	Ta °C
A	19,6	0,96	27,5
B	20,2	0,96	27,5
C	20,8	0,96	27,5
D	21,0	0,96	27,5
E	20,5	0,96	27,5
F	20,1	0,96	27,5
G	20,3	0,96	27,5
H	19,7	0,96	27,5
I	19,3	0,96	27,5
J	20,1	0,96	27,5

Fig. 10, Solaro, Oratorio dei Santi Caterina e Ambrogio, settembre 2004, mosaico dei termogrammi della controfacciata Tab. 3, temperature dei punti A-J localizzati in

Da tutto quanto esposto, ne consegue che la "pavimentazione fredda" dipende sostanzialmente dai processi di scambio termico che si generano tra ambiente/terreno/muratura. Tali processi sono principalmente influenzati dai materiali impiegati nelle strutture e soprattutto dagli spessori; infiltrazioni, orientazione, ombre portate sulle superfici esterne, sono concause che possono sensibilmente variare il gradiente termico tra parete e pavimentazione.

Climatologia e misure microclimatiche

Le condizioni climatiche, in pianura padana sono ben riassunte nel grafico di seguito, in un anno (1997) in cui si sono verificate condizioni nella media centennale.

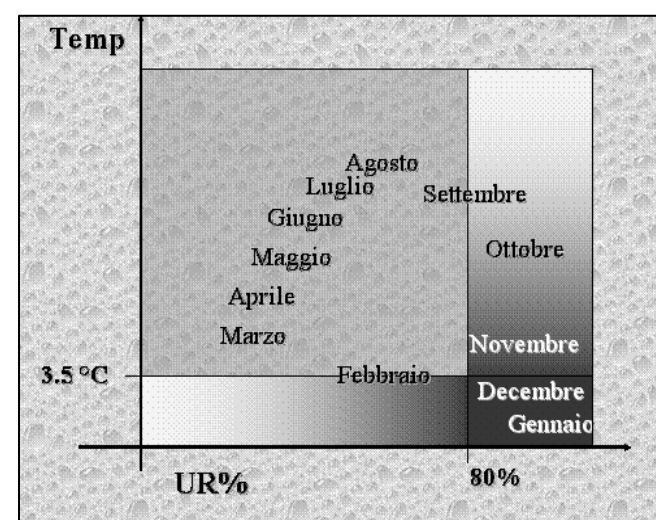


Fig. 11, grafico riassuntivo delle condizioni di T° e UR in Pianura Padana nell'anno 1997

Come si può osservare, nei mesi invernali la temperatura minima raramente supera i 4°C, a fronte di una UR che rimane permanentemente oltre l'80%. Nei mesi autunnali si verificano piogge intense, anche se non durature, che rendono ugualmente critiche le condizioni ambientali. Analogamente accade nei mesi di aprile e maggio, anche se in modo maggiormente sporadico.

Al variare delle condizioni climatiche si osservano differenze indotte sul microclima all'interno degli edifici privi di climatizzazione. Tali differenze dipendono non soltanto dall'escursione che si verifica all'esterno, ma soprattutto da alcune caratteristiche dell'edificio. Innanzitutto la geometria, (il volume, l'estensione della pianta e l'altezza), l'orientazione e l'esposizione delle superfici all'irraggiamento diretto, incidono sensibilmente sugli effetti che si risentono all'interno. Altrettanto importante è la presenza di pareti

e orizzontamenti a bassa resistenza termica (coperture non coibentate, pavimentazioni non isolate, pareti più sottili o costituite da materiali, a parità di spessore, a maggiore conduttività, ecc). La presenza di aperture incide su aree limitate (quelle in cui avviene un diretto irraggiamento dalle finestre), e quindi dipende in larga misura dall'orientazione delle aperture e dalla superficie. Le variazioni dovute all'irraggiamento creano una differenziazione marcata delle temperature di masse d'aria adiacenti, che genera moti convettivi degli strati d'aria all'interno dell'edificio, con conseguente differenziazione, sino a qualche grado, della temperatura dell'aria nel corso della giornata. Senza entrare nel merito di questioni tecnologiche sugli scambi energetici tra edificio ed ambiente, basti osservare che tanto l'articolazione e dimensione degli spazi confinati è un fattore che influenza la "deriva" (il ritardo con cui si osservano le modifiche all'interno rispetto al momento in cui avvengono all'esterno) delle variazioni microclimatiche, quanto l'ampiezza delle escursioni termiche esterne¹¹.

Riguardo a quanto la presenza di un pavimento come "parete fredda" determini variazioni di temperatura degli strati d'aria più immediatamente adiacenti ad esso, si presenta un successivo caso di studio.

Il monitoraggio microclimatico alla chiesa dell'Annunciata di Abbiategrasso, ha permesso di verificare le variazioni di Temperatura e UR lungo allineamenti verticali, e, sul piano orizzontale, a quote diverse, al mutare delle condizioni climatiche esterne. A titolo esemplificativo, si riportano i profili della battuta psicrometrica di marzo 2006 nel presbiterio: i profili scelti, dei 15 rilevati, mostrano una discrepanza piuttosto evidente a quota 0-70 cm. La distribuzione delle temperature presenta un picco a circa 2 m da terra, mentre si verifica che a quota 70 cm la temperatura ha un minimo. Conseguentemente l'UR raggiunge valori massimi (80-82%) appena sopra il pavimento. Le misure sono state rilevate all'inizio della giornata, dopo circa 2 ore di irraggiamento sulla copertura. Gli effetti che perdurano, nonostante il riscaldamento, dipendono dal raffreddamento degli strati adiacenti alla "parete fredda", il pavimento.



Le fig. 12-15: misure di T° e UR lungo 2 allineamenti verticali, da quota 0 a 6 m da terra.

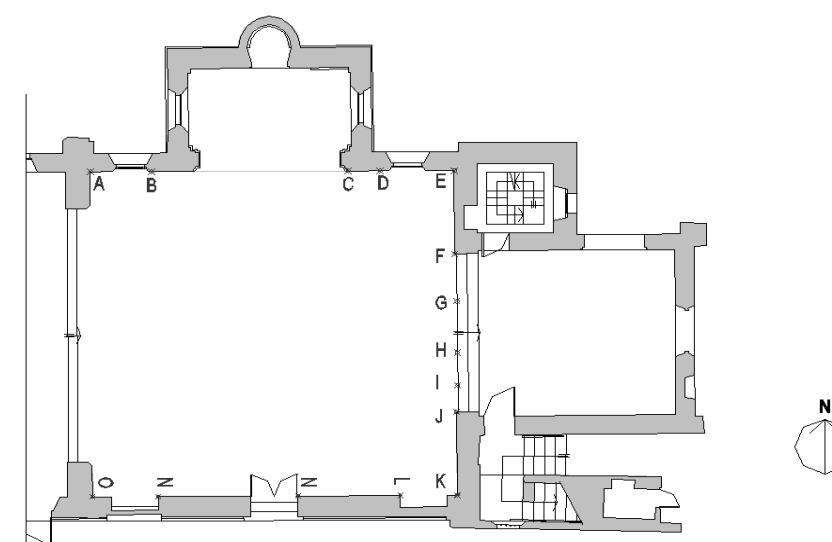


Fig. 16: pianta della regione absidale e presbiteriale della chiesa dell'Annunciata ad Abbiategrasso. Sono indicati i punti di stazione per la misura dei profili psicrometrici.

Conclusioni

L'individuazione delle superfici più fredde, in condizioni climatiche severe, permette la precoce identificazione di zone a rischio e la valutazione degli effetti di tali superfici su quelle adiacenti in concomitanza di fattori ambientali che causano condensazione del vapor acqueo.

La verifica mediante il calcolo del punto di rugiada, è indicativa delle condizioni di rischio di condensazione nel momento in cui si effettua la prova, con dati relativi alle condizioni in quel momento. Solo l'integrazione di un monitoraggio microclimatico annuale permette di interpretare i risultati del calcolo nella corretta prospettiva delle variazioni annuali, in funzione delle modifiche del clima esterno e del grado di coibentazione delle strutture.

La procedura di prova individuata, basata sulle osservazioni sperimentali già rilevate negli anni '80 da Giovanni e Ippolito Massari, fornisce all'architetto e all'impiantista i dati necessari per progettare l'intervento più adeguato, per i criteri esplicitati sopra, in vista del mantenimento delle superfici all'interno dell'intervallo considerato ottimale per la conservazione, e determinato per ogni caso dal monitoraggio di varie tecniche di misura.

Bibliografia

[1] E. Rosina, S. Della Torre, S. D'Ascola, S. Caglio, Restauri a rischio: microclima e differenze superficiali dei materiali in opera, 11 Conferenza Nazionale PND, Milano, ed. AIPND, Brescia ottobre 2005, pp 9

[2] S. Della Torre, E. Rosina, V. Pracchi, G. Suardi, N. Ludwig, V. Redaelli, A. Sansonetti, R. Negrotti, *Le indagini multispettrali per il riconoscimento delle malte di restauro*, XXI Convegno internazionale Scienza e Beni Culturali, Bressanone 2005, Arcadia ricerche ed., Padova 2005, pp. 907-913

[3] G. Massari, I. Massari, risanamento igienico dei locali umidi, Hoepli ed. Milano, 1987

i Sulla base del diagramma di Mollier, gli strati d'aria ($T = 27-28^{\circ}\text{C}$, $UR = 65-60\%$) che lambiscono la superficie, che si trova tra i 23 e i 24°C , sono nelle condizioni per raggiungere il punto di rugiada e quindi condensare.

ii Il monitoraggio annuale a Solaro ha permesso di confrontare i dati delle sonde posizionate all'interno ed all'esterno dell'edificio, e di calcolare il tempo intercorrente (di "deriva" appunto) tra le variazioni esterne ed interne. Ad esempio, durante l'estate l'escursione termica giornaliera è stata contenuta entro gli 8°C , all'esterno, mentre all'interno le variabili ambientali si sono mantenute molto costanti (gradiente termico medio circa 0.5°C). Il trend della temperatura all'interno mostra comunque un aumento, di 2.9°C a luglio, di 0.3°C ad Agosto, e una diminuzione di 1.8°C a settembre. A settembre si è rilevata una maggiore differenza tra la massima e la minima, con un gradiente termico di 5.2°C .

A campione, si è calcolata la "deriva" termica su 3 giornate per ogni mese considerato, scegliendo 3 orari in cui si registrassero le maggiori escursioni esterne: a luglio occorrono 19 ore per ottenere un incremento di temperatura di

0.8°C all'interno, mentre all'esterno l'escursione termica è stata di 9.6°C ; ad Agosto occorrono 7 ore per incrementare la temperatura interna di 0.5°C , mentre all'esterno l'escursione termica è risultata di 8.8°C ; infine a settembre,

occorrono 16 ore per ottenere lo stesso aumento della temperatura interna, mentre all'esterno si è verificato un aumento

di temperatura di 13.6°C . Anche per i valori di Umidità ambientale si osserva una "deriva" tra variazioni esterne e interne, tuttavia non è quantificabile, come per la temperatura, il tempo necessario per indurre variazioni del microclima interno poichè le differenze sono molto più repentine.

6. Diagnostics for the preservation plans of diffused historical heritage

Elisabetta Rosina

Politecnico di Milano, Dipartimento BEST, Via Bonardi 9, 20133 Milano, Italy

Email: elisabetta.rosina@polimi.it; phone +39 02 23994150; fax +39 02 23994931

Abstract

The recent Cultural Heritage Code (2004) defines Conservation as planned, long-lasting process, passing previous concepts of “restoration”. Therefore, it led to innovate the research of testing and studying works of art, which were oriented to the “one shot in the building life”. According to the new perspective, achieving a preventive conservation makes the continuous application of good practices of maintenance necessary, supported by inspection/checking methods and structures to file the knowledge/assessment data. In the most difficult cases, conservation means also developing planned activities to prevent damage along with the maintenance of buildings.

The plan of conservation designs the cure of the building in every step of its life: before the restoration, to avoid the loss of materials and structure with a suitable maintenance and also after the restoration, to keep under control any possible damage which could occur after the intervention. Diagnostics support both the preliminary assessment and the periodical inspections. The aim of checking and monitoring activities is to rule the condition of the environmental and the uses, restraining risks of materials’ conservation in the buildings (not only the conservation of its shape, features and typology as a “stylish” restoration could imply), and leading to a fast, clever interruption of all damage possible causes.

Study cases show the application of early detection of risk factors on buildings and archaeological areas.

1) Protection changes perspective: the conservation as a process

2004 Code (D. Lgs. 42/2004, art. 29) of the recent Italian legal framework for the protection of Cultural Heritage defines Conservation as a planned and long-lasting process, overtaking previous concept of “restoration”. “Conservation” process is made by different steps: study (assessment, documentation and analysis), prevention, maintenance and, only if needed, restoration. Moreover, the new law states that maintenance includes careful control of the state of conservation, instead of being just an automatic repetition of routines. The aim of the recent code leads to innovate the research of testing and studying works of art. Although in the last decades procedures to a preliminary knowledge for restoration were asked, nowadays the requirement is to face the knowledge management, and to reorganize the verified testing techniques and innovative ones as well, according to effective and convenient procedures for monitoring in the field.

In this scenario the investigation techniques based on images analysis got a prominent role.

In fact, requirements of early detection find a perfect match in the characteristics of such tests: taking images does not require contact with the surface, therefore it can be performed anytime without scaffoldings; it is fast and it delivers results in time real; a single shot can be repeated for further comparison and then controlled through time; also, scanning extensive surfaces does not take much time; images of an object, taken in different spectra, supply to many information, which can be collected in a unique informative system. Again, its limited costs allow to repeat applications of these techniques in time to follow up the interventions and their possible consequences, and to keep under control a huge amount of historic buildings, the diffused historic fabric instead of only the monumental ones. Well timed early detection and its extended application are good guarantees for preserving the material authenticity of our built environment, including ancient buildings not yet specifically listed but that make local landmarks of a community.

Preliminary assessment is based on both visual analysis and tests, to set the triage for conservation of the building and deep analysis. Visual analysis allows to get to first level of information, that will be confirmed by early diagnostic. Preliminary tests are a tool that work for analysis itself and they also are a mean to identify critical areas and knots, to define a plan for diagnostics’ next steps (as methods and instruments) to investigate in depth causes and damages. Results of historic/archive documentation, surveys (stratigraphy, damage assessment, etc) and measured drawings supply preliminary diagnostic.

This preliminary use of diagnostic is the most profitable, because it allows to address the project of new use towards sustainable use of the building, and therefore to optimize the residual performances of the building elements, and to identify the necessary additions or implementation of the existing structures.

2) Requirements of the diagnostics for the preservation plans

Preliminary tests lead to listing all of the possible damages causes in the building, and to consequently list suitable interventions; early detections support macro-maintenance programs and the evaluation of the range of their costs. Because of reduced time and economic support in preliminary phase, the devices have to fast deliver qualitative out put, and to be feasible on wide surfaces. Otherwise, first diagnostic aims to address further tests: it works as knowledge supporting structure, allowing to register, connect, and manage informations in all of preservation phases and future enhancement.

Moreover, techniques with such fast and low costs guarantee best results also in emergency interventions [ref. 1-3].

In maintenance and monitoring phases, it is strictly necessary that techniques need low budgets, especially for time for inspection and data processing [4]. Fast scan working techniques on wide surfaces have a considering advantage rather than those techniques that give punctual data back, after a long processing data time. collection of documentation about the building, damage location, its evolution in time, the use across years is mandatory to work out an effective diagnostic plan, especially for preliminary test. The first step of investigation is the assessment of surface conditions by means of multispectral analysis performed by instruments those do not require contact with the detected surface. Previous research [5] showed that periodic controls, multispectral analysis aided, allow to early detecting initial damage due to non homogeneity and vulnerability of structure at critical environmental conditions.

Information in the preliminary phase of project is crucial to define a compatible reuse of the building and to address designer to improve the residual performance of the building. The limited cost and invasivity of tests allow to apply them on the widespread built environment, and to support all the planned conservation activities. In such a way, diagnostics are successfully applied in the most of historic building non monumental, where economic issue is a fundamental criterion for planning intervention and cares: the investigations allow to proceed to a further identification of those damaged areas and damage causes, to an increasing level of accuracy and effectiveness.

3) The contribution of the multispectral analysis

Multispectral analysis is performed in different spectral bands, and it allows to add and validate information regarding the presence of organic components on the investigated surface, detecting salt efflorescence and damaged materials, enhancing cracks, restoration materials. It consists of the integration among some specific image analysis, as listed in the following:

1) Macro and micro photography

It provides the damage evolution control over time. High resolution and magnification are capable of detecting small

cracks and non planar deformations of the surface, different thickness of decorative layers, and superimposition of restoration products. Macro photography at raking light allows assessing most of the defects of the surface, the roughness of finishing, alterations and salt efflorescence. Photographs allow to recapture an initial point of monitoring damage, and the comparison between further recaptures of the same shot allows to distinguish the spreading of damage and its worsening. For that an adequate number of reference marks it is mandatory. In multispectral analysis marks should be distinguished at UV and Infrared too.

Portable microscopy allows detecting initial damage in risk areas: recent researches focus on mapping plaster integration of frescos by multispectral analysis [5] showed that different roughness of surfaces resulted to contribute to cause damage at the edge between patch and fresco at severe microclimatic condition. An early detection of damage is enhanced by a recurrent recapture of surface nearby the edge between different plasters. Particularly, in case of high RH and low T, and above all when their quick and sharp variations causes frequent condensation/evaporation cycles, the microscopic analysis in the field of those critical edges is very effective to diagnostic the starting decay, especially if microscopy is associated to laboratory tests (for example ionic chromatography) for identification of crystallized soluble salts on the damaged surface. In fact, each type of crystallized salt has different hygroscopic properties and specific threshold of solubilisation in condensed water, therefore the cycle of evaporation/condensation of water varies in timing and frequency depending on the presence of salts and their mixture [6, 7]. Consequently also damage extension, evolution in time and seriousness can vary. Results of techniques integration permits the restorer to choose the most adequate intervention for preserving the surface from further major damage, delaying in time any extensive and complex intervention.

2) UV photography

UV Fluorescence imaging [8, 9, 10] uses a high resolution photographic technique to scan the surface which is exposed to UV irradiation. UV photos let mapping map areas where biodeterioration developed, as well as organic restoration products were applied. Moreover, the intensity of fluorescence gives indirect information about the time of application of the restoration products. For that, different color of the surface fluorescence can be connected at different damage and components. The techniques is traditionally applied on movable paintings, and scientific literature reports applications on frescoes and plasters only recently.

3) Thermal infrared scanning.

The techniques of imaging in the spectral bands of visible and infrared has been very useful to detect surface and subsurface anomalies. These thermal anomalies at a critical microclimatic conditions are responsible for possible damage due to a differentiated thermo-hygrometrical behavior [11]. Recaptures are shot by active and dynamic or passive approaches. In the first case, IRT permits to map the new patches when these materials have a different density, or surface finishing, than original fresco. Mapping surface temperature permits an early detection of risk areas in time, and it can be periodically repeated without any damage of investigated surfaces, time of survey is short and it can be applied on extensive areas.

Moreover, active approach allows to detect, localize, analyse, even measure structural elements underneath the plaster, effectively supporting the structural evaluation and the choice of the further steps of the diagnostic process.

4) Main applications

Structures detection: cracks, texture of masonry, hidden structural elements, opening infilling

Many diagnostics techniques allow to localize voids and different materials in the structures, and the scientific research has been doing several new step in these last years, especially regarding the data processing: for example GPR (Ground Penetrating Radar), sonic and ultrasound tests, impact-echo and the techniques that use the stimulation of the structure. Among them is possible to find among these the most suitable application to any specific kind of masonry and researched defects. Nevertheless all these tests require that contact between the surface and application is along profiles or points which have to be chosen very carefully, in order to get significant data.

Therefore, the best practices indicate to use these techniques in the phase of advanced diagnosis, after the localization of the most critical zone by preliminary scanning.

On the contrary, multispectral analysis leads to shooting images of the whole surface under investigation in a short period of time, still with the limitation to be applied only few cm underneath the surface. Particularly, IRT has numerous application [12, 13, 14] which have the great advantages of being non destructive and to be applied without any contact with the surface. Nevertheless, IRT requires an active approach to obtain any information regarding the layers of the structure underneath the plaster. That’s means to stimulate the masonry with a heating flux, powerful enough to increase the surface temperature of 0.5-1°C. Often the environment supplies the necessary thermal stimulation, otherwise (in case of interior finishing, northern orientation of the elevation, or bad weather) it is required an artificial heating. The choice of the thermal stimulation is and crucial to obtain any result, therefore the calculation of the power, time, kind of heat transfer to produce are mandatory. Maths models and algorithm effectively support these choice, besides to the experience of the diagnostic designer.

Moisture detection: employed techniques

Moisture detection consists in crossing the results of IRT with the data coming from low destructive techniques for

measuring water content in selected samples. Thermal scanning has to be applied to the whole surfaces under investigation, with the aim to find out thermal gradients which are indicative of moisture evaporation. IRT mapping permits an early detection of damp areas, even though the damage is not yet visible. Therefore the scanning has to be applied to interior and exterior surfaces, and it has not to be limited to the decayed areas. Passive approach is recommended for its speed and feasibility on wide surface. Even though the economic convenience of passive approach, operators have to take in account some severe limitations [15, 16]. Ambient conditions affect results; therefore operators measure air T and RH during the scanning and in the 24 hours before the test. Low air temperature and high RH inhibit evaporation and consequently the thermal gradient between wet and dry surfaces is so reduced that it could become indicative of many other thermal processes occurring on the surfaces. A further integration with low destructive measurements of water content allows to quantitatively determine the amount of liquid water in the structure. Thermal analysis of IRT scanning allows the identification of critical zones where water content could be high. Operators collect few small samples of the surface material in the colder areas, and for comparison, on the warmer ones. A further step is measuring water content in the collected samples by gravimetric tests (according to the current nationale rule UNI 11085), calcium carbide, and more innovative tests, as the Fixed Points Method (PPM) [17] and Evanescent Dielectricity (EFD), Nuclear Magnetic Resonance (NMR) [18].

Monitoring ambient and surface conditions

Monitoring air Temperature, RH and surfaces Temperature, is performed by means of non contact techniques such as probes, psychrometric tests (according to the national current raccomandation UNI 10829) and IRT. Repeated psychrometric surveys allow to record variations of microclimatic conditions; measurements are performed along a grid of measurement points which cover the extension of the whole building. Data processing consists on plotting the results into thematic maps (each for any measured variable, RH, SH, T), which have the same metric reference of measured drawings of the building. Finally, the superimposition of thematic maps and building plants allow to connect variation of distribution of air T and humidity to building structure and morphology.

Integration between these data and thermal scanning of interior surfaces, at different ambient conditions, permits to find out most critical zones, in which operators will focus the further step of investigation [19]. The researchers set probes in these parts of the building in order to measures air T and RH at an adequate rate for monitoring variations. Moreover, contact probes are set on the surfaces, according to the results of a preliminary IRT scanning, for measuring Temperature variation in time. The authors evaluate surface thermal unbalances, their connection with the use of the building and the effects of environmental affection on the building thermo-hygrometrical balance, in order to define the corrective actions on the boundary conditions to erase or reduce unbalances [20]. It is well known that variations of the thermal-hygrometrical balance between ambient and surfaces is the main condition leading to exchange water across the surface, and it causes damage to the surface during water change of states (liquid/vapour). Early detection of surface thermal gradients is an effective alert of incipient damage: if the surface does not already show decay, a rapid change of critical boundary conditions can prevent its manifestation. Nevertheless a timely intervention require to take in account the whole process of exchange between masonry, surface, microclimate and exterior ambient and, above all, the criteria of preservation and use of the buildings under investigation.

While the application focus is to set the most reliable and feasible procedure in the field, in the laboratories of Politecnico, National Research Council and State Univeristy of Milano a study is ongoing on new methods to characterize the thermo-hygrometrical behaviour of surface under monitoring, in order to find out the parameter to keep under control for the early detection of damage and the risk assessment [21, 22].

5) Study cases

Preservation plans for buildings

Planned preservation is a suitable philosophy for preventing damage causes both on monuments and diffused historic buildings. In the following the examples refer the application of diagnostics in the conservation process on both the buildings: the first study case shows how diagnostics supplied the maintenance program, at the end of the restoration process; the latter case shows how diagnostics supported the decisions about the restoration of the frescoes. In both of the cases diagnostics indicates the causes of risks for the conservation of the materials.

Curia Palace in Rome

In 2006, after almost one century from the construction of the Capitol (Rome, Italy), paintings that decorate the upper part of the courtroom walls required restoration.

At the elevation of 15 m from the floor, 50 painted panels hang on the walls, running all around the perimeter. The painting technique included the use of wax, mixed with pigments. In 2004 The National Trust officers performed a preliminary assessment and a pilot intervention on one panel, defining the guideline for further intervention on the whole masterpiece. Between January and September 2006, a study has been performed about complex process of canvas' restoration. The whole process have been achieved without interrupting Parliament activities in the Hall.

Between 2006 and 2007 the Politecnico Best laboratory performed an ambient monitoring, to assess microclimatic condition: knowledge of ambient conditions, and their variations, allows to find out damage causes [23]. Moreover the discussion of the results indicated the necessity of a more suitable use of the hall to assure conservation and long lasting effects of restoration.

Monitoring program included:

- 1. control of air temperature and RH, by means of 31 probes distributed along the courtroom perimeter, at 6, 11.5 and 15 m from the Tribunes's floor (plus one probe outside, on a terrace in the exterior facade);
- 2. psychrometric maps of the Hall and Tribunes, and psychrometric vertical profile under windows, when HVAC system was both on and off
- 3. measures of air speed where the outputs are and nearby, on the surfaces of the paintings;
- 4. maps of surface temperature (by IRT) on these areas;

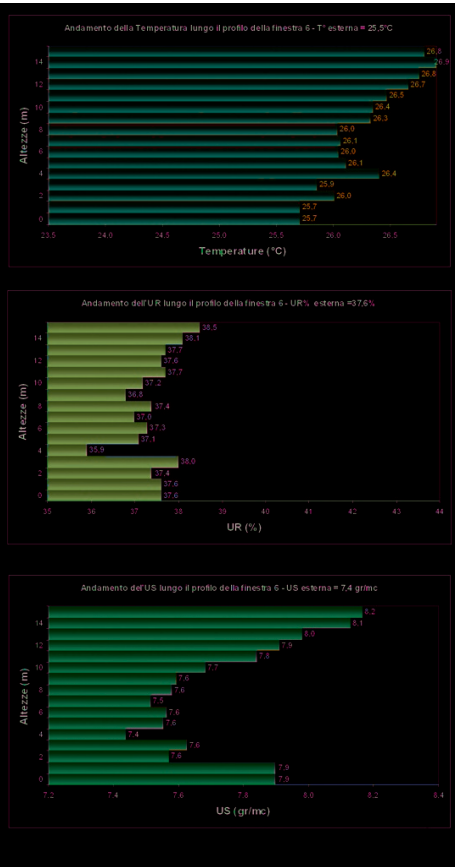
Results

Microclimatic monitoring results pinpointed that main variations of microclimatic conditions are due to HVAC system, whereas trend of external ambient conditions slightly affects Temperature and Relative Humidity inside the hall:

- ❖ RH/T°C values have a small gradient (DT = 4.5°C, DRH = 30%) during summer, fall and winter
- ❖ Daily thermal gradient of air and surfaces is below 4°C, during heating/air conditioning operation
- ❖ Air conditioning causes higher thermal gradient than heating
- ❖ Most of recorded values of RH are within the range suggested by in force (UNI 10829/99), except data recorded during a prolonged heating/conditioning (over 8 hours) and during direct ventilation of Hall. In these cases, when outdoor air Temperature is low and RH high, probes recorded RH and T°C unbalance up to 6-9 m from Tribunes's floor, and sometimes some additional effects are recorded up to 11.5 m
- ❖ Before turning HVAC on, major differences of data are recorded at from the floor. Higher variations (always within 1°C) occur while is working.
- ❖ From comparison of pscymetric vertical profiles, probes data, IRT, resulted that higher variation are between 4 and 8 m, and they due to air intake from HVAC. Results are similar about 2/3 of the semicircle's wall. Differences are in some parts of semicircle, air intakes exist but are not in function and in Tribune #5, where vertical heating pipes are located inside lateral wooden columns, their temperature generates highest temperature variations of surface and in the surrounding air, up to Hall's ceiling. High temperature of wooden surface, and consequently low RH of air, contributed to cause cracks in timber columns, especially in the facing the Hall.



The small church of San Rocco is located near Milano, in San Pietro all'Olmo (city of Cornaredo, Italy). It was built in 15th century, completed in 19th century. The interior was frescoed between 1451 and 1524. Because of the change of the owners, in the 20th century between the '60s and the '80s the building had not any kind of maintenance, therefore many damages occurred to the structures (especially the roof) and the frescoes. Therefore in 1987-1993 it went under a complete restoration.



rules
the
very
6 m
HVAC
and
are
where
and
sides
F
ig.1.
the
parlam

ient Hall. All the diagnostic measurements and restoration were performed without interruption of the use of the hall

Fig. 2: an example of the results of microclimate monitoring, the graphs of the vertical distribution of air T°C, RH, SH along a profile from the floor to the window

Saint Rocco church in Cornaredo

Nevertheless, the condition of frescoes got worse and worse, and in 2007-2009 the City of Cornaredo, led by the Preservation Officer in charge for the conservation of ancient monuments, ordered the emergency intervention on frescoes and the necessary investigation on the causes of damage. Restorers secured the poor pictorial layers by applying nanometric slaked lime. Nanometric slaked lime consists of nanosized particles of calcium hydroxide dispersed in alcoholic medium, which serve as consolidants for limestones and painted surfaces affected by different kinds of decay. They are highly efficient as penetrant strengthening of frescoes and decorated stones, after the removal of the previous restoration products. An integrated study of microclimate monitoring, IRT, gravimetric tests and portable unilateral NMR was applied in the framework of planning emergency intervention on a very deteriorated wall painting in S. Rocco Church, Cornaredo (Milan, Italy).

The microclimate monitoring of the internal and external conditions of the S. Rocco church over more than one year (2007-2008), strongly suggested that only in few late spring/summer weeks the microclimate conditions may assure the good conservation of the surface of the wall paintings.

The survey of thermal anomalies of the surface obtained by IRT investigation, led the choice of the points where the wall was drilled to obtain samples for gravimetric tests.

The IRT investigation supported by gravimetric tests showed that the worst damage was localized on the northern fresco, while in the other sides of the church masonry resulted almost dry.

To summarize, IRT and gravimetric tests showed the presence of two wet areas separated by a dry area. The moisture found in the lower area is due to rising damp, coming from the garden soil and the lack of rain disposal from the gutter pipe. The moisture found in the upper area was associated to the and the infiltration from the connection with the surrounding wall and the poor quality of the employed materials: the lacking waterproof protection of the wall and its connection allows the rain to soak the masonry. Further investigation in the second phase of the diagnostic process [24] permitted to confirm the diagnosis and to ascertain other causes of damage: the condensation phenomena associated to a marked presence of soluble, hygroscopic salts and the use of not appropriated restoration products.



Fig. 3, interior of Saint Rocco chapel in Cornaredo, northern side

Fig. 4, composite of thermograms of the northern side, thermal gradient due to rising damp and water leakage



re and RH between December 2007 and January 2008

Protection of findings in archaeological areas

Conservation plans in archaeological areas include inspection, monitoring and the maintenance of the findings, the management of risks due to the interaction with the environment, which may cause the speeding up of damages process in the open air after the excavation of findings.

Major causes of degradation are: rain (mechanical stress and chemical dissolution of binders), wind (mechanical stress and abrasion of the surfaces), solar irradiation (thermal stress, different and opposite dilatation of materials), UV rays (damage of binders and pigments), fast evaporation/condensation cycles (because of salt crystallization and their spreading on the surfaces and within the materials) and especially their combination.

A protection plan requires a deep knowledge of the history of the site, the excavation steps, materials and their reactions with the environment. First of all, protection design implies to define the inspective and maintenance activities to prevent the environmental risks, and to keep under control the state of conservation of the findings at open air. Then, in case exceptional care is required, to design and install shelters to prevent further damages, especially due to sun irradiation. For that, any kind of shelter is effective to shadow the findings; nevertheless the quality of protection sharply increases when the availability of the data regarding the thermal-hygrometrical exchange between the surface of findings and the environment supports the designers's choices of shelters materials, shape, orientation and supporting structures. On the other hand, scientific literature of the last decades [25, 26] highlights the dangerous effects of shelters in mediterranean areas, when the design is focused only on architectural aesthetics and users requirements, while the night/day thermal-hygrometrical variations causes delamination of the surfaces, cracks in stones, fading colors, disruption of mortars (and restoration products) etc.

Each archaeological site requires a specific conservation plan, based on the existing materials, their state of conservation and local parameters (orientation, slopes, location, elevation, proximity to large water reservoir, agricultural areas, industries, roads), its accessibility, speed and direction of winds, vegetation, amount of rainfalls and canalization of rain water, etc.

The following study case shows the application of innovative diagnostics, based on the integration of psychrometrical maps, profiles, IRT and steady procedures of monitoring. The results after one year allowed to pinpoint the parameter to support the design of a new, effective, sustainable shelter to protect the fragiles ruins.

Su Monte in Sorradile

Su Monte archaeological ruins are settled nearby Sorradile Village, at the very heart of Sardinia. The area is on the south-eastern slope of Lago Omodeo, a huge water reservoir built in the '30s for preventing drought in inland.

The archaeological finds are a "nuraghe" (main type of ancient megalithic edifice found in Sardinia) religious settlement, dating back to the end of 12 century BC [27]. The complex is composed by an elliptic fence of 100 by 60 m. Inside the fence there is a group of buildings. The main building is a circular temple and trapezoidal entrance hall, its masonry consist on two-three courses of trachyte blocks. In a not yet defined date, a lightning fired the temple, causing the end of the use of the site and an extensive damage to the stones. The structures recently went under restoration, because of the fast spalling of the stone surface after the excavation (lasted between 1998-2003).

In 2006 the National Trust realized a provisional shelter and provided the necessary maintenance of the area in order to prevent the non controller growth of vegetation. The areas enclosed too, to prevent animals passage and grief. In 2007 the main building went under restoration, because the surface of stones were falling into chips, due to weathering and especially sharp daily thermal excursions, moisture and huge, very frequent RH variation.

The location, the stone material, the restoration shelter, were excellent to study the behaviour of ruins and shelter exposed to typical climate of inland in Mediterranean Region.

Therefore Politecnico di Milano planned a preliminary monitoring of microclimate and surface temperature in 2007-2008. the results allowed to optimize the measuring plan, and to merge the steady methods with innovative application of IR thermography and psychrometry, in order to define the critical areas and the requirements for the conservation, including the kind, shape, dimension, structure, orientation of the definitive shelter and its materials.

The researchers hypothesized that the shelters contribute to increase the damage if:

- 1) it is opaque to Infrared radiation, therefore the radiation emitted by the ruins (due to sun irradiation/heating) remains trapped underneath the shelter, increasing the surface temperature of the protected materials
- 2) the shape of shelter prevents ventilation, therefore humid air mass underneath the shelter, during the cooling, condenses water on the coolest surfaces, which could be the ruins, the supporting metallic structure, etc.
- 3) orientation of the shelter does not protect from direct sun irradiation during the hottest hours of the day (according to the seasons, and the location of the ruins)
- 4) collection of rain water from the shelter is not proper and effective
- 5) shelter brakes and anchorage requires invasive and massive concrete foundation nearby/across the ruins

Climate in a chart

20 days a year the air temperature is close/below 0°C

The lowest air temperature is -2°C

Average air temperature (minimum) is 8-10°C

Average rain in a year is 600-900 mm

Fig. 5 and 6, graphics of the average air temperature

	<i>At present</i>	<i>Requirements</i>
Rising damp and rain	protection from the rain, not from the slanting ones	protection of all the environment risks
	no gutters and pipelines for collecting rains	Gathering rain from the roof, the soil and piping it out of the site
	rain stagnates on the soil	prevent rain collection on clay soil, drain rain water
Structure fodnation	foundation can be easily removed	limited supporting structure and foundation (design the proper location to ensure the most conservation of the findings). Minimal contacts with the findings. Total reversibility
Display	the shelter does not hide the findings	
Microclimate	in the hottest hours of the summer the shelter reduce the temperature of the shadowed stones (up to 20°C); at night reduce the cooling (5-6°C)	improvement: rule light and air across the shelter in any season to <ul style="list-style-type: none">improve the protection from sun irradiationnatural ventilation for decreasing the thermal imbalance, dew on the surfaces
	no dangerous air overheating close to the intradox	
	southern and wester sides receive direct sun irradiation during the day (local thermal imbalance)	vertical movable protection
	surface temperature higher (5-10°C) close to the edge of the shelter	wide and prominent eaves

Average RH in January is 60-65%, in April 45-50%
Global sun irradiation in January is 170 MJ/mq, in August is 580 MJ/mq (day average)

- Wind direction is NE,W,SW,

Results

1) thermal imbalance

- The stone surfaces have variables thermal stress according to the plane (horizontal/vertical), the elevation, the location (close/far from the shelter edge), the orientation
- Sun irradiation is the major cause of heating in any season, the highest values depend on the power of irradiation
- The least surface temperatures in the night (and before dawn) since september to may are very close o the dew point. RH is always close to 90% in tose hours

2) Air Humidity

- RH has always high values in Su Monte, because of the close huge lake Omodeo. In any season, but especially since fall to spring, RH sharply decreases/increases (gradient 30-40%) just after the dawn and sunset: because of the heating of the rocks in the first hours of the morning, the water evaporates very quikly, causing salt efflorescences on/in the surfaces
- At sunset the the air Temperature sharply decreases, and condensation occurs starting from the colder surfaces (the metallic structure of the shelter, the cordest stone). Condensation implies liquid water on the surfaces: on the horizontal surface the liquid water is lasting for a longer time. Therefore on these surfaces the presence of the water causes the solubiliation of the crystallized salts and consequently the absorption of salts solution in the surface.

3) Moisture and rising damp

- Rising damp resulted in some small areas, nevertheless it is a serious risk for the conservation of structures, because the evaporation of the water implies the crystallization of salts (already set in the lower part of the northern elevation)
- Moreover the slope of the soil contribute to gather rains towards the sheltered area and the clay in the soil makes the water to stagnate.
- The material has to support the mechanical stress due to its weight: in case of wet structure the resistance is lower, especially to the tractive effort. Moreover, the surfaces are exposed to rapid variation of Temperature and RH, the frequent cycles of wet/dry causes stress underneath the surface, where the

water remains trapped. The result is the damage (flaking, cracks, exfoliation)

As a conclusion the protection of an archaeological area requires a numerous multilevel activities. The design of a new shelter has an important role, but gathering the rain around the area will have a wider effects

Guide lines for the design of a new shelter and maintenance plan for the conservation in a chart

plan of maintenance		
<i>present performances</i>	<i>requirements</i>	<i>actions</i>
fast growth of vegetation is a risk for conservation	continuative care	periodical grass cutting and use of biological peste
no alert system for human or animals intrusion in the area	installation of alert system conneted with the police station nearby early detection of malfunctioning of the rain collection system early detection of occurring damage	maintenance of the alertn system maintenance of the eave gutters and the pipe line for gathering rain microclimate monitoring periodical inspection of critical points (looking for salts efflorescence)

Guide lines for the maintenance plan of the area in a chart

7. Conclusions

The installation of probes is a cheap investment, it has the advantage to define the parameters fro the optimal conservation of the structures and finishing. Because of the necessity to record data for at least one year (in order to distinguish the natural/artificial variations of RH and air temperature due to the seasons and dayly cycles and their affection on the microclimate), the best time for starting the monitoring is always “early”, at the beginning of the assessment, as soon as possible.

In monitoring the choice of the place to set the probes is crucial, more than the choice of the probes themselves. It is required to preliminary localize the spots more interesting for the variaziions or because of the presence of precious surface under risk.

Monitoring has to include the measurements of the exterior condition (sun irradiation, winds, etc) in addition to the interior microclimate, because it is mandatory to observe all the interactions between the building and the environment.

For that, the dayly journal of the intervention in the yard is crucial to consider the affection of the steps of works on the surface thermo-hygrometrical balance. For examples, it is possibile to detect the affection due to the change of the roof coating (and improvement of the insulation) by monitoring RH and T.

And finally, regarding the archaeological areas, it is fundamental their management as it is crucial monitoring the microclimate and local climate: damage can slow down if the boundery conditions are not a risk for the conservation. For that the synergetic collaboration of all the stake holders is a mandatory requirement for the conservation of the site.

References

- [1] S. Della Torre (ed.), *La conservazione programmata del patrimonio storico-architettonico. Linee guida per il piano di manutenzione e il consuntivo*, Guerini, Milano, 2003
- [2] Tema 3/2001 *Dossier conservazione programmata*
- [3] S. Della Torre, E. Rosina, M. Catalano, C. Faliva, G. Suardi, A. Sansonetti, L. Toniolo, G. Valentini, R. Cubeddu, D.Comelli, *Early detection and monitoring procedures by means of multispectral image analysis*, in proceedings of “8th International Conference on Non Destructive Investigations and Microanalysis for Diagnostics and Conservation of the Cultural and environmental Heritage”, Lecce May 2005
- [4] S. Della Torre, E. Rosina, C. Faliva, M. Catalano, 2006, *Sperimentazione di tecniche analitiche integrate per la diagnostica finalizzata alla conservazione preventiva*, in proceedings of “IV Congresso Nazionale IGIIC, Lo stato dell’Arte”, Siena September 2006, Nardini ed. Firenze 2006
- [5] E. Rosina, N. Ludwig, V. Pracchi, G. Suardi, *Compatibilità e durabilità dei restauri degli affreschi in condizioni microclimatiche severe*, proceedings of “XXIV Convegno Internazionle Scienza e Beni Culturali”, Bressanone July 2008, Arcadia ricerche ed., Venezia 2008
- [6] C. Sawdy, C. Price, *Salt damage at Cleeve Abbey, England. Seasonal variability of salt distribution and implications for sampling strategies*, part I and II, Journal of cultural heritage 6, Elsevier ed., Amsterdam 2005
- [7] C. Colombo, S. Montonato, R. Negrotti, V. Pracchi, M. Valentini, *I sali solubili negli edifici storici: alla ricerca di un valore di soglia*, in proceedings of “ IV Congresso Nazionale IGIIC, Lo stato dell’arte”, Siena June 2006, Nardini Ed., Firenze 2006
- [8] H.P. Aceterieth, A. Aldrovandi, P. Turek, (1990), Die Praxis die UV Fluoreszenzfotografie, “Z. Kunsttechnol. Konserv.”, n 42, volume 2, 1990
- [9] D.C. Creagh, D.A. Bradley, *Radiation in Art and Archaeometry*, Elsevier ed., Amsterdam 2000
- [10] F. Mairinger, *UV, IR and X Ray imaging*, in “Non Destructive microanalysis on Cultural Heritage materials”, Elsevier, Amsterdam 2004
- [11] E. Rosina, *La percezione oltre l'apparenza, l'architettura all'infrarosso*, A-Linea ed., Firenze, 2004
- [12] N. Ludwig, E. Rosina, *Heat Transfer Models for Detecting Deep Structures in Masonry*, 4th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, IROE, Firenze 1997
- [13] E. Grinzato, E. Rosina, *Infrared and Thermal Testing for Conservation of Historic Building*, Chapter 18 Part 5, Non Destructive Testing Handbook, third edition, volume 3, Infrared and Thermal Testing, ASNT Columbus (OH) USA March 2001
- [14] A. Grimoldi, E. Grinzato, E. Rosina, V. Vavilov, E. Di Flumeri, G. Roche, V. Papetti, *Capturing The Building History by Quantitative IR Thermography*, 3rd International Congress on Science And Technology For The Safeguard of Cultural Heritage in The Mediterranean Basin, Alcalá de Henares, Spain, July 2001
- [15] N. Ludwig, E. Rosina, 2001, *Detection of the Moistened Surfaces by Active and Passive T/IR*, in “Atti della Fondazione Giorgio Ronchi”, n 3, May-June 2001, ed.CNR-IROE, Firenze 2001
- [16] G. Cruciani Fabozzi, E. Rosina, M. Valentini, 1999, *La valutazione del regime termoigrometrico della muratura: integrazione di termografia e prove ponderali*, “Tema” n 2 dossier, Ed. New Press, Milano 1999
- [17] M. Valentini, *Una metodologia poco invasiva per la misura del contenuto di acqua delle murature*, proceedings of the Workshop “Monitoraggio e conservazione programmata”, Venaria Reale (Torino), 25 /11/05, Kermes quaderni, Nardini ed., Firenze 2005
- [18] R. Olmi, An integrated approach to mapping moisture and salt content in two frescoes in the Basilica of San Clemente, SMW08, International Workshop on In situ monitoring of monumental surface, 27-29 October 2008, CNR ed. Florence 2008
- [19] E. Rosina, *Controlli speditivi per la tutela del costruito storico diffuso, dal progetto preliminare alla conservazione preventiva dopo l'intervento*, Proceedings of national conference “La diagnostica intelligente”, Cosenza June 2007, ed. Nardini, Firenze 2008
- [20] S. Della Torre, E. Rosina, *Rapid techniques for monitoring historic fabric in preservation plan*, proceeding of SMW08, International Workshop on In situ monitoring of monumental surface, Florence 27-29 October 2008, CNR ed. Florence 2008
- [21] N. Ludwig, E. Rosina, *Restoration mortars at IRT: optical and hygroscopic properties of surfaces*, Proceedings of the 8th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, June 2006, Padova, CNR-ITC ed. Padova 2006
- [22] E. Rosina, N. Ludwig, S. Della Torre, S. D’Ascola, C. Sotgia, P. Cornale, *Thermal and hygroscopic characteristics of restored plasters with different surface textures*, in Materials Evaluation vol. 66, n 12 december 2008, ASNT Official Journal, Materials Evaluation (Columbus – OH, USA)
- [23] P. Gasparoli, E. Rosina, *Preserving restoration of Sartorio paintings in Montecitorio Capitol*, Proceedings of the International Conference “Conservation of Science 2007”, CNR ed. Milan May 2007
- [24] N. Proietti, D. Capitani, M. Gobbino, L. Soroldoni, U. Casellato; M. Valentini; E. Rosina, *An integrated study for mapping the moisture distribution in an ancient damaged wall painting*, Analytical and Bioanalytical Chemistry, n 395, Springer Verlag Heidelberg ed., 2009
- [25] International Conference "Protective shelters for archaeological sites in the southwest Usa", ICOMOS and National Park Service US, Tumacacori (AZ-US) 2001
- [26] *Le coperture delle aree archeologiche: museo aperto*, M.C. Laurenti editor, Roma, Gangemi ed., 2006
- [27] *La civiltà Nuragica, Nuove acquisizione*, II vol., proceedings of the conference, Senorbì 14-16 dicembre 2000, ed. Ministero per i beni e le attività culturali, Soprintendenza per i Beni Archeologici della Sardegna, 2008

7. Textile shelters for archaeological areas: a change in the preservation of Cultural Heritage

Paolo Beccarelli², Elena Romoli¹, Elisabetta Rosina², Alessandra Zanelli²

¹ Soprintendenza per i Beni Archeologici delle provincie di Cagliari e Oristano

² Politecnico di Milano, Building Environment Science and Technology Department

Abstract

To overcome the limitations of traditional covering systems, a project for the creation of new shelters has to combine all current preservation requirements, (specifically; the compatibility and reversibility of new materials and protection from environmental aggression) along with new issues such as, flexibility, feasibility, low maintenance requirements, ease of disassembly and reusability.

The topic of this paper is the protection of archaeological sites, it will detail the authors' research activity and a pilot project undertaken in Sardinia (Italy). Several technical aspects are analysed, highlighting solutions which could contribute to damage rather than serve to protect. The experimental set up and results sections describe the creation of two prototypes, produced in order to evaluate the technical performance of an alternative solution to the provisional shelter and several sets of solar irradiation measures taken in order to evaluate the behaviour of some innovative textile materials in comparison with traditional ones.

Keywords: membrane structures, fabrics, IRT, decay, solar irradiation, Sardinia, monitoring

1 The Conservation of Archaeological Sites in the Mediterranean Region

There exists a delicate balance between conserving ancient archaeological sites and making them accessible to increasing numbers of visitors. Nowadays, this is one of the greatest challenges faced by institutions involved in the preservation and promotion of local culture. This issue is particularly significant in countries which are home to a considerable number of cultural heritage sites. It is universally known that the history of the Mediterranean Basin represents a fundamental step in occidental history. This has created an extraordinary historical heritage with a consequent large number of archaeological sites which are in need of protection and promotion.

The protection of ruins in archaeological areas should be in conformity with various requirements, some of them have been discussed in the past and some of them have only recently been pinpointed thanks to a more technological approach: the contextuality of new shapes on ancient sites (requirement of design), the exploitation of the “didactic” function (requirement of display), the compatibility and removability of new materials within the ruins (preservation issue of reversibility/compatibility), protection from environmental aggression (due to: use; the landscape and the climate).

In the last few decades, the attention of scholars and professionals has been attracted, especially with regards to the final two issues. For example, research has been carried out on the effects of weathering on ruins, both protected and unprotected by shelters.

The Authors continue this trend with the present paper dealing with the protection of archaeological areas in Sardinia. The case study of the Su Monte area shows the application and results of a pilot project.

These sites generally have an elaborate building plan with consequent maintenance difficulties, requiring specific expertise and a scientific approach. Moreover, the geographical context in which the archaeological site is located imposes the need for an accurate assessment of the environmental impact

due to the protection covering system. Furthermore, the changeable climatic conditions, both throughout the year and during a single 24 hour cycle, open up several issues related to the adequacy of current protection in the area.

According to the scientific literature, some causes of resultant damage are: rain (mechanical stress and chemical dissolution of binders), wind (mechanical stress and abrasion of surfaces), solar irradiation (thermal stress, different and opposite dilatation of materials), UV rays (damage of colours and pigments), fast evaporation/condensation cycles which causes salt crystallisation and their spreading on the surfaces and within the materials, and more importantly a combination of all the above factors.

The uses of shelters in archaeological areas are numerous: starting from the excavation, when movable and small shelters protect workers and finds, to the restoration and display phases, during the application of strengthening and protective products, and finally, for protecting part of the restored finds from weathering. With this in mind, the project of the creation of new shelters has to combine the requirements for preservation and new issues for use, such as flexibility, feasibility, ease of maintenance, ease of disassembly and reusability. The

research shows the priority of preservation, functional and technical aspects to the formal and design features.

Lightweight structures made using technical fabrics represent a possible alternative to the standard approach to the preservation of archaeological sites. Currently, the use of tensile structures for the protection of archaeological sites has not yet been thoroughly investigated. One application in this context can be found in the Caposoprano archaeological area in Gela (Sicily), where a modular saddle shaped series is employed to protect an ancient Greek military fortification. Another relevant example in which it is possible see an innovative reversible foundation system, is the wide span tensile structure designed for the Haġar Qim megalithic temple complex in Malta.



Figure 1. Covering system in Caposoprano, Gela (Sicily). Picture by Canobbio./ Figure 2. Haġar Qim megalithic temple complex, Malta. Picture by Canobbio.

2

Su Monte Archaeological Area in Sardinia

The chosen case study is the “Su Monte” archaeological ruins which are located near the Sorradile village, at the very heart of Sardinia. The area is on the south-eastern slope of Lago Omodeo, a large reservoir built in the 1930s for preventing drought inland.

The ruins are that of a “nuraghe” religious settlement (the main type of ancient megalithic edifice found in Sardinia), dating back to the end of 12 century BC. The complex is composed of an elliptic fence of 100m x 60m. Inside the fence there is a group of buildings, the main being a circular temple with a

trapezoidal entrance hall. The building consists of two-three courses of trachyte blocks. On a not yet defined date, lightning struck the temple, causing its abandonment and extensive damage to the stone. Following excavation of the site the structures underwent restoration between 1998 and 2003 due to the fast spalling of the stone surface.

In 2006, the National Trust created a provisional shelter, and also provided the necessary maintenance of the site in order to prevent uncontrolled growth of vegetation. This site was also fenced off to prevent encroachment by wildlife. In 2007, the main building underwent restoration. The surface of the stones had been eroding due to: weathering, sharp thermal excursions during a 24 hour period, moisture, along with a huge very frequent Relative Humidity (RH) variation

The location, the stone material and the restoration shelter provided an excellent opportunity to study the behaviour of ruins and a shelter exposed to the typical climate of an inland area in the Mediterranean Region.

3 Aims & Objectives

The first aim of this research is to improve understanding of the various aspects that should be considered when designing a flexible demountable shelter for finds protection in the Mediterranean Area.

The second aim of this project is evaluate the effectiveness of textile membranes for use as waterproof covers or shading. Currently, protection of finds is achieved by using solutions which involve traditional and local materials, such as the reed ceiling used in Su Monte. In this context, the new architectural fabrics can be integrated with the traditional building system, providing an alternative solution based on new technical innovation and materials.

4 Hypothesis and methodology

One of the most important aspects to consider is that an incorrect design can contribute to an increase in damage rather than protection. This can happen when the cover is opaque to infrared radiation, in this situation the radiation emitted by the ruins (due to solar irradiation/heating) remains trapped underneath the shelter, thereby increasing the surface temperature of the protected materials. Secondly, if the shape of the shelter prevents ventilation humid air can be caught underneath, during cooling water will then condense on the coolest surfaces, which could be the ruins, the supporting metallic structure, etc. Thirdly, it is not unusual that the shelter's orientation does not afford adequate protection from direct solar irradiation during the hottest hours of the day (according to the seasons, and the location of the ruins). Another significant source of damage is the collection of rainwater on the shelter in the situation where the collection and drainage of rainwater has not been considered properly and effectively. The water collected can damage the finds, falling down on them and also flowing through the ruins. Finally, in several solutions shelter brakes and anchorages often require invasive and massive concrete foundations nearby/across the ruins.

For these reasons, the study is based on functional aspects, considering the requirements related to temporary and seasonal use which lead to the development of a basic shelter "kit" that can be adapted, modified and customised in order to meet the stated requirements. This can be achieved through an innovative building approach based on "hyper-lightweight" frame structures and high performance technical fabrics often from other industrial sectors (such as extreme sports, the nautical industry, the aerospace industry, etc.).

The research is based on a multidisciplinary approach supported by the numerous competences available at The Building Environment Science & Technology (B.E.S.T.) Department at The Technical University of Milan (Politecnico di Milano) in partnership with the "Innovative Textiles" Cluster which collect expertise in architectural technology, civil and mechanical engineering, chemistry and industrial design; coordinated by Alessandra Zanelli. By means of a scientific multidisciplinary approach in the design, the research group aims to understand the numerous aspects involved in the protection and preservation of cultural heritage.

The methodology can be divided into three steps. First, a frame of reference was identified, analysing all the problematic aspects involved. Subsequently, two materials were chosen for the waterproof and shading layers and two prototypes were constructed. Finally, several parameters such as temperature, humidity and solar irradiation were recorded, using different prototype configurations, over twenty-four hours and at different times of the year.

During the first step the frame of reference was created, examining aspects related to weathering exposure conditions, maintenance problems on the site and all restraints connected with the surroundings. In addition, other similar experiences were taken into account and climatic simulations were carried out in an attempt to predict the positive effects of different covering materials and arrangements.

Elisabetta Rosina, responsible for the experimental laboratory of The B.E.S.T. dept. (mobile unit), planned a preliminary monitoring of the site microclimate and surface temperature in 2007-2008 within a research plan promoted by Elena Romoli for the Sardinia Archaeological Register office. This preliminary study showed that for 20 days a year the air temperature is close to or below 0°C with the lowest air temperature being -2°C. The average values of air temperature and rain over a year are 8-10°C (minimum) and 600-900 mm. The area is also characterised by an average RH of 60-65% in January and 45-50% in April, a total solar irradiation of 170 MJ/m² in January and 580 MJ/m² in August (daily average) with the prevailing wind from the NE, W and SW.

The results allowed for optimisation of the measuring plan. Standard methods were integrated with innovative application of IR thermography and psychrometry in order to define the critical areas and conservation requirements. The creation of a definitive shelter was investigated, taking into account different types, shapes, dimensions, structures, orientations and materials.

5 Experimental set up

The two prototypes enabled evaluation of the technical performance of alternative solutions to the provisional shelter. Through these physical models, protection performance was analysed, with solar radiation and rainfall taken into account.

Consequently, materials and building systems were chosen to meet several requirements such as time taken for assembly and disassembly, an easy mounting procedure, feasibility of use with non-specialised workers, and finally, a general use flexibility which allows the same module to be reused in different locations. For these reasons, architectural fabrics were chosen as the most suited material as they were able to meet all requirements, such as being lightweight, being easy to procure connection elements and being easy to use.

The prototypes were designed as simple tent structures using an existing supporting frame, made from scaffolding pipes, which support the reed ceiling. The design activity focused particular attention on a reduction in assembly costs sacrificing a

correct tensioning procedure, using basic anchorage details and maximising results in terms of protection performance through a multilayer roofing system.

However, due to the mechanical resistance of the fabric, future developments should take into account tensile structures in order to provide protection and resistance from the wind.

The testing activity investigated two different configurations. Firstly an integration of existing traditional reed ceilings and a new false ceiling made using mesh fabrics (indicated by 2a, 2b and 3 in Figure 3 and Figure 4) which were also used as lateral shading. Secondly, a cover fabricated exclusively with coated fabrics and mesh fabrics (indicated by 1 and 4 in Figure 3 and Figure 4) was evaluated as a possible alternative shelter based on new material.

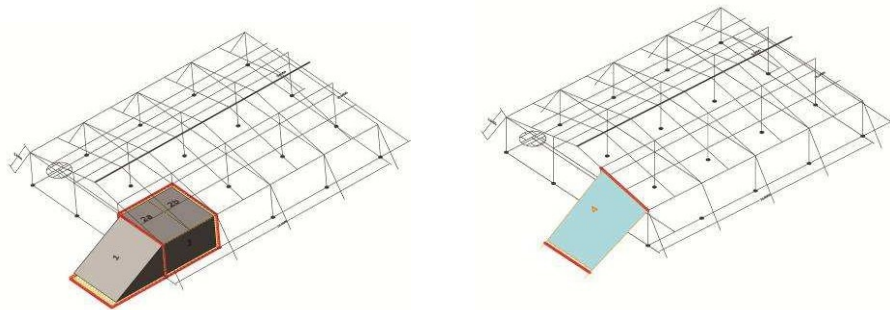


Figure 3. Shading layer mounting scheme. Figure 4. Waterproof layer mounting scheme

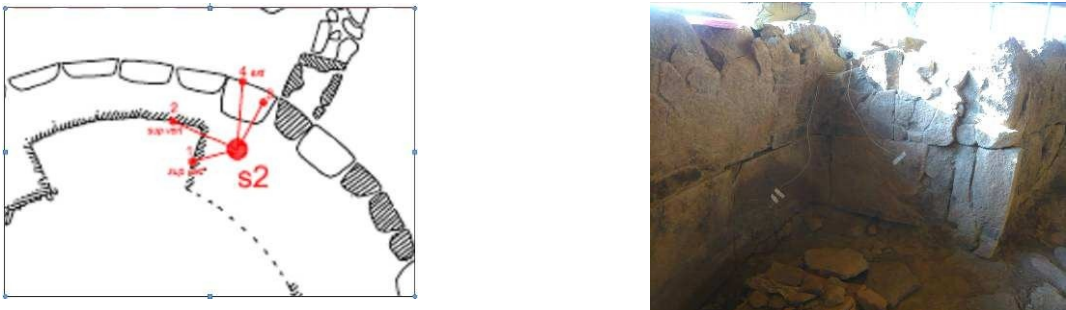


Figure 5 Diagram of the positioning of the surface temperature probes S2 1 and S2 2

Figure 6 Interior of the main room, positioning of the surface temperature probes S2 1-4

The composite textile membranes chosen, produced with equivalent characteristics by several manufacturers, belong to Ferrari Textile production. In particular, Stamisol FT381 3128, classified Bs2d0 according to EN 13501-1 (practically non- flammable, the total smoke production as well as the ratio of increase in smoke production are limited, no flaming droplets/particles occurred), was selected for the shading layer. Whereas, Precontraint 1002T2 back PVDF white, classified B1 according to DIN 4102-1 (flame resistant building materials) was chosen for the waterproof layer.

	Name	SOLAR TRANSMISSION	SOLAR REFLECTANCE	SOLAR ABSORPTION	SOLAR FACTOR	Euroclass
		Ts	Rs	As	g	EN 13501-1
PVC-Polyester layer	Precontraint 1002T2 back PVDF	6%	78%	16%	12%	B1 (din 4102-1)
Shading layer	Stamisol FT381 3128	29%	38%	33%	21%	Bs2d0

Table 1. The properties of each membrane. Data by Ferrari.

Once the prototypes were completed in July 2009, several sets of solar irradiation readings were taken across the traditional shelter, (consisting of a reed ceiling and an insulating layer, the traditional shelter and an additional horizontal shading layer, the PVC-Polyester layer, the shading layer, the addition of PVC-Polyester and shading layers) in order to evaluate the behaviour of the innovative textile materials compared to the traditional ones.

A photoradiometer (HD 2302.0, Torran inc.) served to measure solar irradiation (direct and diffused). The authors performed measurements (Figure 7) under the shelter and outside, close to the shelter edge and inside the room.

Measurements were performed at dawn, at noon and at sunset, in order to compare the effects of the shelter and its additional layers at different irradiation intensities. Moreover, IR Thermography was taken during each collection period in order to measure the surface temperatures of the walls while the textile sides were shadowing the sides.

6 Results

The results of the experimental activity showed that the irradiation coming through the overlapped PVC-Polyester and shading layers was small (16-17 W/m2) almost the same as the amount of irradiation passing through the reed ceiling shelter (17-19 W/m2). The addition of a horizontal shading layer underneath the reed shelter reduced the irradiation to 7-8 W/m2. The irradiation passing through the shading layer was 102 W/m2, whereas the irradiation passing through the PVC-Polyester layer was 40 W/m2. The use of overlapped PVC-Polyester and shading layers thus yielded the same results as those for the traditional shelter. The addition of a shading layer to the traditional shelter increased filtration of solar radiation.

From a thermal imbalance point of view the stone surfaces showed a variable thermal stress according to the plane (horizontal/vertical), the elevation, the location (close/far from the shelter edge) and the orientation. Solar irradiation was identified as the major cause of heating in any season therefore the highest values depended on the intensity of the irradiation. The lowest surface temperatures during the night (and before dawn) from September to May were very close to dew point. Relative humidity was always close to 90% in those hours.

RH is generally high in Su Monte because of its proximity to a large lake (Lake Omodeo). In any season, but especially from autumn to spring, RH sharply decreases/increases (gradient 30-40%) just after dawn and sunset: due to heating of the rocks in the early hours of the morning. The water evaporates very quickly, causing salt efflorescence on/in the surfaces. At sunset the air temperature sharply decreases and condensation occurs, starting from the colder surfaces (the metallic structure of the shelter, the coldest stone). Condensation implies liquid water on the surface it was in fact observed that on the horizontal surface the liquid water remained for a longer time. Therefore, on these surfaces the presence of the

water caused the crystallised salts to dissolve and consequently the absorption of the salt solution into the surface.

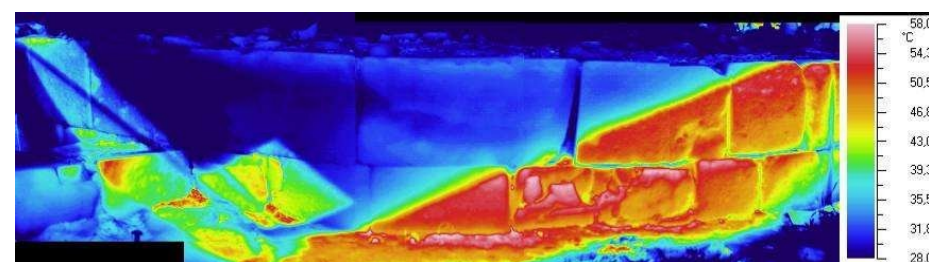


Figure 7 Infrared Thermograms composite, see the hesting effects of the poor shadowing of the shelter on the western side at noon on July 29th, 2009.

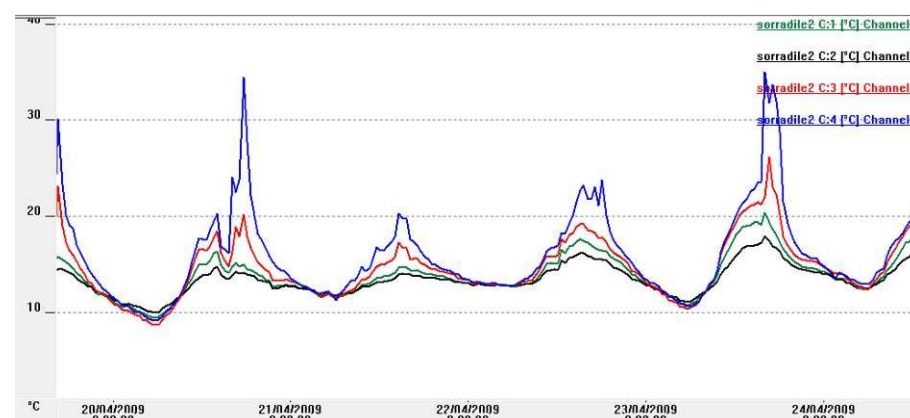


Figure 8 Graphic of the surface temperature measurements of probes S2 1-4 during the days April 20-24 2009. See the high temperature imbalance between noon and sunset as measured by probe S2-4, which is set on the exterior, western vertical side.

Rising damp occurred in some small areas, this is a serious risk to the conservation of structures, because the evaporation of water implies the crystallisation of salts (already set in the lower part of the northern elevation).

Moreover, it was noticed that the gradient of the soil caused surface water to flow towards the sheltered area and clay in the soil caused the water to stagnate.

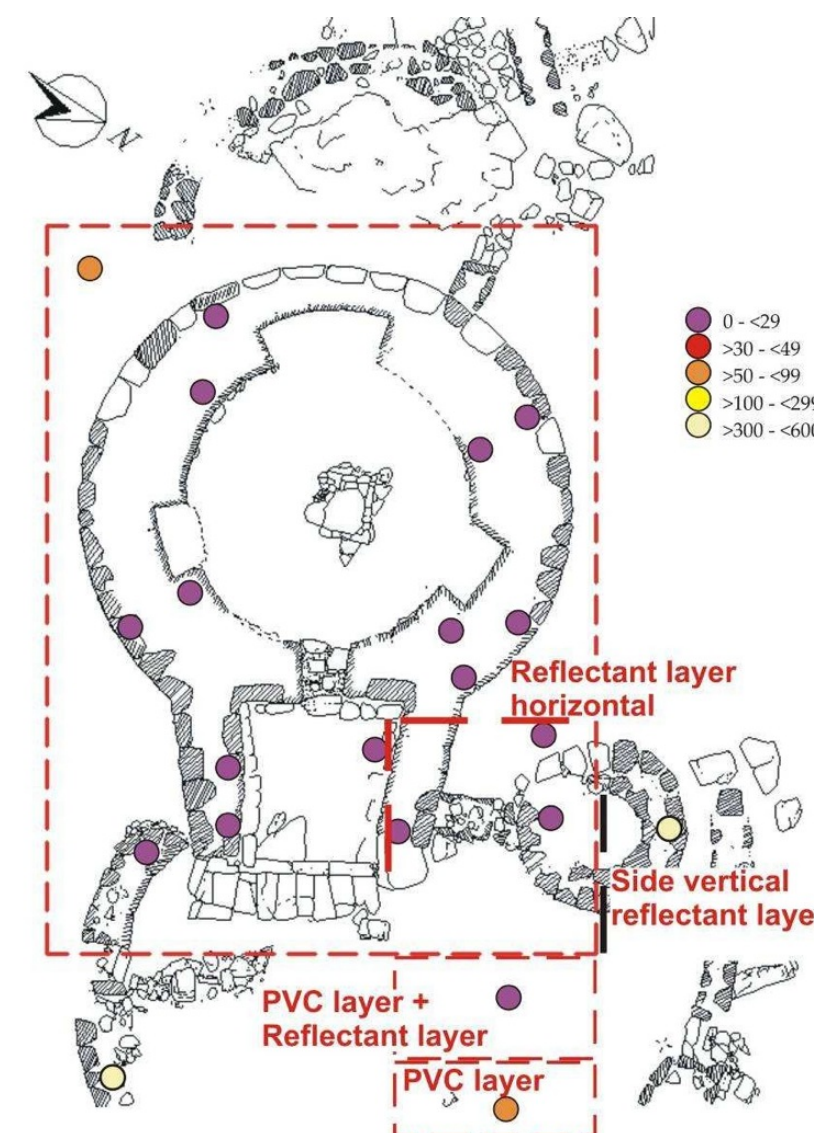


Figure 9 Measurements of the irradiation after setting the textile shelter and sides in addition to the reed ceiling. The diagram shows the location of the horizontal shading layer underneath the roof, the location of the exterior PVC and shading layers, the vertical shading layer as vertical side. The coloured circles show the location of measurements of irradiation. The colours show the power of measured irradiation on the spot (W/m^2)

The material has to support mechanical stress due to its weight: in the case of a wet structure the resistance decreases, especially to constrain the tractive effort. Moreover, the surfaces are exposed to rapid variation of temperature and RH, the frequent cycles of wet/dry cause stress underneath the surface, where the water remains trapped. During the experimental activity this was indeed observed and this lead to damage such as flaking, cracks and exfoliation.

5 Conclusions and future works

The research showed that the performances of the PVC-Polyester layer meets several of the requirements relating to the protection of archaeological finds. Both materials, also when not combined in a double layer solution, showed interesting behaviour from the point of view of solar irradiation.

Comparing the costs and the advantages of protection by fabric shelters, the research concludes that fabric shelters are highly competitive and a valid alternative to traditional ones, guaranteeing the same protection from solar irradiation. Furthermore, these types of structures offer several advantages such as higher flexibility, lower visual impact, modularity, suitability to any orientation of the shelter (horizontal, vertical, etc), reusability, lighter supporting structures, feasible stockage on site, easy transportation, low maintenance requirements, fast installation/dismantling and finally, higher durability in general, compared to traditional types.

The use of textile shelters is not only limited to the covering of findings after their display; the textile shelters meet many other needs of archaeological sites, for example the protection of workers and findings during the excavation phase, the periodic protection of fragile and corruptible findings during the wet season, the seasonal protection from the fading of frescoes and mosaics, etc.

In future research, testing campaigns will be carried out in order to prevent side effects related to ageing of the fabric and following alterations in absorption and reflection properties. Moreover, it is expected that the data obtained will also be able to help develop a pilot project to investigate architectural and engineering aspects.

References

- [1] DELLA TORRE, S., ROSINA, E., *Rapid techniques for monitoring historic fabric in preservation plan*, Proceedings of SMW08, International Workshop on In situ monitoring of monumental surface, Florence 27-29 October 2008, CNR, Florence, 2008.
- [2] CAMPIOLI, A., MANGIAROTTI, A., ZANELLI, A., *Architecture in the Italian Context, Designing Tensile Architecture*, International journal of space structures, 23, 4, 2008, pp. 201-206.
- [3] ROSINA, E., *Controlli speditivi per la tutela del costruito storico diffuso, dal progetto preliminare alla conservazione preventiva dopo l'intervento*, Proceedings of national conference La diagnostica intelligente Cosenza June 2007, Nardini, Firenze, 2008.
- [4] BOGNER-BALZ H., ZANELLI A. (eds), *Ephemeral Architecture. Time and Textiles*, Proceedings of Tensinet Symposium 2007, 16-18 April 2007, Politecnico di Milano, Clup, Milano, 2007.
- [5] AA. VV., *La civiltà Nuragica, Nuove acquisizioni, II vol.*, atti del convegno, Senorbì 14-16 dicembre 2000, ed. Ministero per i beni e le attività culturali, Soprintendenza per i Beni Archeologici della Sardegna, Quartu S. Elena, 2008.
- [6] LAURENTI, M.C., (eds.), *Le coperture delle aree archeologiche: museo aperto*, Gangemi, Roma, 2006.
- [7] CAMPIOLI, A., ZANELLI, A., (eds.), *Architettura tessile*, Il Sole-24 ore, Milano, 2009.
- [8] FERRARI, *PVC textile composite membrane manufacturer*, <http://www.ferrari-textiles.com>, 2010.
- [9] CANOBBIO, *Manufacture of textile structures*, <http://www.canobbio.com>, 2010.

- [10] POLITECNICO DI MILANO, *Italian portal for membrane structures*, <http://www.architetturatessile.polimi.it>, 2010.

8. SPERIMENTAZIONE DI TECNICHE ANALITICHE INTEGRATE PER LA DIAGNOSTICA FINALIZZATA ALLA CONSERVAZIONE PREVENTIVA

Stefano Della Torre, Elisabetta Rosina, Chiara Faliva, Michela Catalano

Dipartimento BEST, Politecnico di Milano, Via Ponzio, 31 – 20133 Milano, e-mail: stefano.dellatorre@polimi.it

Abstract

La conservazione preventiva si attua attraverso un insieme di buone pratiche, che presuppongono il supporto di sistemi di controllo e archiviazione strutturata della conoscenza. Nei casi più critici questo si traduce in attività programmata di prevenzione e manutenzione. Tali programmi si avvalgono del supporto diagnostico, sia per la valutazione conoscitiva preliminare, sia per i controlli, ripetuti nel tempo, volti a consentire il governo delle condizioni ambientali e d'uso, e un eventuale intervento tempestivo sulle iniziali forme di degrado.

A questi fini sono stati sviluppati protocolli e procedure di indagine che rispondano ai requisiti di affidabilità e ripetibilità delle prove in campo, rapidità di esecuzione ed applicabilità su aree estese, rilascio di informazioni in tempo reale, esecuzione senza contatto con la superficie dell'oggetto. Non da ultimo, un requisito considerato

importante per l'applicabilità al patrimonio diffuso è il modesto impegno economico richiesto per ottenere

essenziali valutazioni preliminari, semi-qualitative, ma indicative dell'evoluzione dei processi che causano, o possono causare, il degrado.

I recenti sviluppi del settore tecnico-scientifico, riguardo alle tecniche più consone alla finalità della conservazione programmata, sono orientati su tre filoni principali:

- l'individuazione di elementi o parti della struttura che, per materiali impiegati e tecniche costruttive, possono costituire un fattore di rischio (o vulnerabilità) per le condizioni di conservazione dell'edificio nel suo insieme;
- la localizzazione di aree a rischio di degrado per finiture superficiali in condizioni microclimatiche severe;
- la stesura di protocolli e procedure di indagine, basati su tecniche telemetriche e qualitative, ma sempre più mirati e quantitativi in funzione del livello di conoscenza via via acquisito, che fondino sull'integrazione e sul "data crossing" la validazione dei dati misurati.

Le linee introdotte sono state sviluppate nell'ambito di progetti di ricerca con sperimentazione in laboratorio, e casi di studio di cui si intende presentare una breve rassegna, evidenziando soltanto gli aspetti salienti.

I casi studio cui ci si riferisce potrebbero essere in particolare:

- Palazzo Marchesale di Botrugno (LE)
- Ex-chiesa dell'Annunciata di Abbiategrasso (MI)

Introduzione

Nel 2004, in Italia, è stato dato un nuovo quadro legislativo alla conservazione. Il nuovo Codice dei beni culturali (D. Lgs. 42/2004, art. 29) definisce non più il restauro, ma la conservazione come processo di lunga durata e programmato, composto di diverse fasi: lo studio, la prevenzione, la manutenzione e, qualora si renda necessario, il restauro. Inoltre la legge vuole che la manutenzione non sia ridotta a operazioni ripetitive condotte senza pensare, ma comprenda un attento controllo.

Questo nuovo scenario, al quale dovranno essere armonizzate tutte le altre leggi, richiede un rinnovamento nella ricerca delle applicazioni scientifiche allo studio delle opere d'arte. Se negli scorsi decenni sono stati definiti protocolli per la conoscenza preliminare, orientata all'intervento di restauro, ora si richiede di affrontare problemi di gestione della conoscenza, e di riorganizzare le tecniche collaudate, così come eventuali applicazioni nuove, secondo protocolli efficaci e convenienti per il monitoraggio, e soprattutto per operare in una logica nuova di riduzione del rischio.

La diagnostica finalizzata all'intervento è stata indirizzata nell'ottica di una caratterizzazione e di una valutazione dello "stato di conservazione". Al di là delle perplessità epistemologiche di una descrizione per stati, si può concedere che tale valutazione equivalga a un riconoscimento dei processi di alterazione e degrado intervenuti e in atto. Qualche autore parla di riconoscimento delle cause di alterazione di un presunto equilibrio, e per anni l'intervento di conservazione è stato presentato come il ristabilimento di tale equilibrio, mediante interventi pensati per rimuovere le cause in atto, con qualche discussione invece sugli effetti, riconoscendo al tempo il ruolo di "grande scultore".

Consolidati in questo atteggiamento, ci chiediamo oggi come si possa definire, e riempire di contenuti, una diagnostica non immediatamente finalizzata all'intervento.

La mancanza di una finalizzazione immediata può forse renderla più libera, più disponibile a mettersi al servizio di una conoscenza disinteressata, che trovi la sua massima utilità proprio nel porsi al di fuori di una immediata utilizzazione? Siamo convinti che una curiosità di questo tipo sia necessaria per dare a qualsiasi processo conoscitivo il fondamento di una prospettiva storica.

Ma è probabile che la vera differenza si ponga su un altro livello, meglio identificabile se si riflette sul fondamento epistemologico di una conservazione pensata come gestione del divenire, e non come evento che ristabilisce l'equilibrio (1).

La diagnostica propedeutica all'intervento si occupa di fatti reali, non può dedicarsi ad approfondimenti che richiederebbero tempi troppo lunghi, trova limiti precisi nel livello descrittivo fissato dalla scala propria dell'operatività. La diagnostica pensata per la prevenzione non può invece che occuparsi di potenzialità da evitare. Deve quindi costruire una descrizione ancor più accurata, ha tutto il tempo di approfondire e verificare, trova un limite sia deontologico che pratico nella necessità di essere il meno distruttivo possibile, trova attualmente ancora pesanti limiti di natura finanziaria, deve farsi carico di una visione sistemica, ovvero, nella versione più riduttiva del termine, almeno dell'interazione ternaria tra l'oggetto, l'osservatore e il mutare delle condizioni al contorno (2).

Fondamentale per questa costruzione diventa allora la recente elaborazione teorica sul concetto di compatibilità (3). Come si è da più parti sostenuto, per trattare di compatibilità è necessario che nell'oggetto siano presenti delle differenze (materiali diversi, diversamente lavorati, diversamente invecchiati...), che le condizioni al contorno abbiano variazioni, che si fissino dei limiti di accettazione delle conseguenze innescate da tali variazioni nei diversi componenti. Questo conduce, nella logica di una conservazione di lungo periodo comprendente la prevenzione come attività caratterizzante, a operare non tanto modificando gli oggetti per renderli più omogenei, quanto lavorando sulle condizioni al contorno affinché le loro variazioni non determinino condizioni inaccettabili. Si tratta cioè di gestire la incompatibilità interna propria degli oggetti in modo da non uscire da un "dominio di compatibilità".

Pertanto la diagnostica finalizzata alla conservazione preventiva ha come oggetto proprio la identificazione:

- delle differenze, anche secondarie, ma suscettibili di reagire diversamente alle variazioni ambientali;
- delle variazioni delle condizioni al contorno, e in particolare dei parametri microclimatici;
- degli effetti osservabili di tali variazioni.

Non si tratta di inventare nulla di davvero nuovo, ma di raccogliere le trame di molte esperienze degli ultimi decenni, sviluppate parallelamente alla diagnostica finalizzata al restauro, a volte ridotte a un ruolo complementare all'intervento, dando a questo corpus di ricerche lo statuto di una nuova centralità. La ricerca dovrà definire protocolli e procedure di indagine che rispondano ai requisiti di affidabilità e ripetibilità delle prove in campo, rapidità di esecuzione ed applicabilità su aree estese, rilascio di informazioni in tempo reale, esecuzione senza contatto con la superficie dell'oggetto. Non da ultimo, un

requisito considerato importante per l'applicabilità al patrimonio diffuso è il modesto impegno economico richiesto per ottenere essenziali valutazioni preliminari, semi-qualitative, ma indicative dell'evoluzione dei processi che causano, o possono causare, il degrado.

I recenti sviluppi del settore tecnico-scientifico, riguardo alle tecniche più consone alla finalità della conservazione programmata, sono orientati su tre filoni principali:

- l'individuazione di elementi o parti della struttura che, per materiali impiegati e tecniche costruttive, possono costituire un fattore di rischio (o vulnerabilità) per le condizioni di conservazione dell'edificio nel suo insieme;
- la localizzazione di aree a rischio di degrado per finiture superficiali in condizioni microclimatiche severe;
- la stesura di protocolli e procedure di indagine, basati su tecniche telemetriche e qualitative, ma sempre più mirati e quantitativi in funzione del livello di conoscenza via via acquisito, che fondino sull'integrazione e sul "data crossing" la validazione dei dati misurati.

Campi di applicazione e casi di studio

I casi di studio sono interessati o da progetti di riuso e rivitalizzazione, così che necessitano di un dettagliato piano di intervento conservativo, o di piani di conservazione programmata.

Soprattutto per questa seconda circostanza, sono state ottimizzate le procedure di prova, e le integrazioni delle tecniche non o minimamente distruttive che consentissero di poter controllare nel tempo le condizioni al

contorno (ambientali e microclimatiche) e gli effetti delle loro variazioni sui materiali in opera, al fine di poter

disporre di risultati affidabili e prove poco costose.

In particolare, le ricerche sono state sviluppate su tre filoni principali: il riconoscimento di materiali di restauro e delle alterazioni patologiche delle superfici mediante tecniche di analisi dell'immagine, il controllo di anomalie termogrometriche nelle strutture e finiture, dipendenti dalle caratteristiche dei materiali impiegati e dalle tecniche costruttive, il controllo delle variazioni di condizioni ambientali e microclimatiche per la localizzazione precoce delle superfici a rischio.

Tecniche di immagine multispettrali

Negli ultimi anni le applicazioni della diagnostica ad immagini per lo studio e la ricerca si sono moltiplicate, in diversi campi che vanno dalla medicina alla biologia, all'industria fino all'arte. In particolar modo, oltre agli strumenti necessari, si sono sviluppati software in grado di elaborare digitalmente l'immagine, permettendo

all'operatore di analizzare e modificare colori e geometrie. Nel campo della conservazione degli edifici storici, il

trattamento delle immagini digitali è legato a due filoni di ricerca differenti.

Il primo riguarda la trasformazione delle informazioni contenute in un'immagine per ottenere un contenuto informativo superiore, in relazione al punto di vista semantico. Le elaborazioni possono avvenire a livello geometrico e/o cromatico ed essere puntuali, locali o globali, oppure permettere l'analisi morfologica dell'immagine (fotogrammetria, termografia, tecniche soniche e ultrasoniche) (4, 5). Il secondo filone interessa la rappresentazione sintetica e la simulazione di oggetti, attraverso la quale è possibile eseguire anche simulazioni di natura progettuale (fotogrammetria e laser scanner, programmi di simulazione dei flussi di calore). Nel caso di studio presentato, l'integrazione di tecniche di analisi in bande spettrali diverse ha consentito di confermare i risultati acquisiti e di compendiarne le informazioni, al fine di identificare e dirigere le successive fasi di conoscenza e progetto.

Palazzo Marchesale Catriota di Botrugno

Nel presente caso di studio, su cui si sono applicati i risultati della ricerca Sidart (2004-2006), in collaborazione con gli enti di ricerca CETMA di Brindisi, IBAM – CNR, che ha fornito la caratterizzazione mineralogico – petrografia degli intonaci, ICVBC - CNR di Milano, che ha effettuato le analisi di caratterizzazione degli strati pittorici, si è avuto modo di studiare l'integrabilità di alcune tecniche di analisi multispettrale per la valutazione preliminare dello stato di fatto di strutture e finiture decorate. In particolare, la campagna diagnostica si è concentrata nelle stanze con dipinti murali al primo piano, alcune dipinte nel 1773 da Ludovico Giordani, e altre da Domenico Abbracciamento agli inizi del Novecento.



Fig. 2 e 3 - Ripresa fotografica con luce naturale e con luce ultravioletta della parete C, e, in fig. 4, della volta



Le tecniche di indagine si sono basate sulla ripresa fotografica, ad alta definizione, in condizioni di luce differenti da quelle naturali, in particolare con l'utilizzo di lampade ultraviolette, con lo scopo di mettere in evidenza le zone con presenza di materiali a base organica in superficie. La ripresa fotografica permette di catturare il punto zero di un dato fenomeno e di confrontarlo in momenti successivi con l'eventuale evolversi dello stesso: la ripresa fotografica costituisce la tecnica più semplice, economica ed efficace di monitoraggio. Nel nostro caso

specifico, essa è risultata utile nel monitorare gli effetti delle infiltrazioni sulle volte. Le riprese fotografiche effettuate con luce UV hanno messo in evidenza alcuni rifacimenti degli intonaci e lo sviluppo di alghe. Ad esempio, la zona adiacente allo spigolo a sinistra e che è delimitata dalla fessura verticale, presenta un colore giallognolo; invece l'intera area a destra della porta reagisce producendo un colore violetto, uniforme ed omogeneo. Lo stesso fenomeno interessa la superficie del sopraporta, in cui risulta evidente la differente fluorescenza delle due superfici accostate e parti della volta, in particolare alcuni riccioli del partito decorativo.

Sulle quattro pareti è stata individuata una forma di alterazione cromatica per cui la superficie dipinta risulta interessata da macchie di colore più scuro, distribuite in modo disomogeneo. In luce ultravioletta le macchie scure risultano fluorescenti, al contrario delle parti chiare.

Sulle superfici voltate sono state inoltre evidenziate alcune patine biologiche che hanno prodotto un colore che va dal rosso scuro al bruno, come evidenziato nella fig. 4. La termografia all'infrarosso è stata utilizzata per l'individuazione delle zone più fredde e quindi indicative della possibile presenza di infiltrazioni, a cui si debbono la maggior parte dei degradi presenti, quali disgregazione delle tinte e degli intonaci, efflorescenze e patine biologiche. La ripresa termografica, rispetto all'osservazione diretta a distanza, ha consentito di aggiungere un nuovo dato utile alla comprensione del fenomeno: l'estensione reale delle infiltrazioni, che può non corrispondere per morfologia ed estensione ai degradi superficiali visibili e, in particolare, alle macchie di umidità e alla presenza di patina biologica che ricopre gli elementi lapidei.

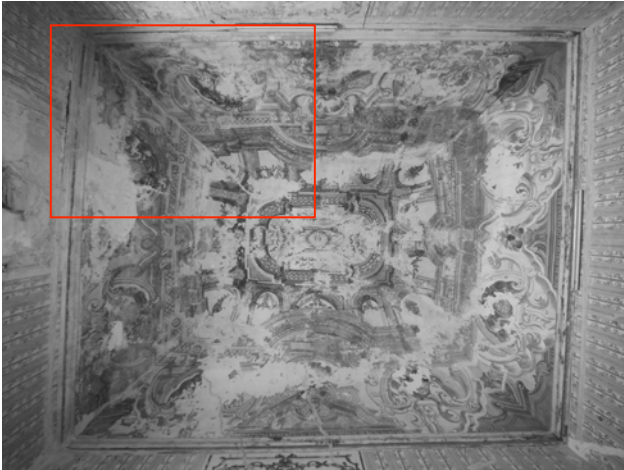


Fig. 5 e 6, volta della stanza 118 e mosaico dei termogrammi corrispondenti (UR amb = 35%; T° amb= 30.2°C, range T° = 22-27.5°C)

Ad esempio si veda in fig. 6 le riprese effettuate nella stanza 118, dove è stata individuata una zona fredda in corrispondenza dello spigolo tra la volta e due pareti. Per il rilievo della tessitura muraria in alcuni locali in cui risultava cruciale conoscere le caratteristiche della muratura, sia sotto l'aspetto delle tecniche costruttive, sia in riferimento all'analisi stratigrafica, si è fatto uso di termografia all'infrarosso con procedure attive. Le immagini termografiche della *Parete C* mostrano un arco ribassato sopra la finestra: la temperatura superficiale dell'intonaco in corrispondenza dei conci che lo costituiscono è inferiore rispetto alla media della parete.



Fig. 7, 8 – Parete C e volta della Stanza

Si possono inoltre effettuare alcune informazioni riguardo al degrado: si notano le infiltrazioni (zone più scure all'imposta della volta) e le lesioni ad andamento verticale. Nell'immagine 10 si può notare anche che la parte inferiore di dette lesioni è passante: in fase di raffreddamento, è possibile individuare un flusso di aria più fredda proveniente dall'altro lato della muratura, come linea più scura all'interno della zona più calda che caratterizza i bordi distaccati della fessura. La termografia all'infrarosso permette di rilevare la tessitura della volta incannucciata. In corrispondenza dello spicchio B, si possono distinguere le suddivisioni dei pannelli di incannucciato, che hanno una dimensione di circa 1 m di larghezza. Nella volta si distinguono alcune infiltrazioni.

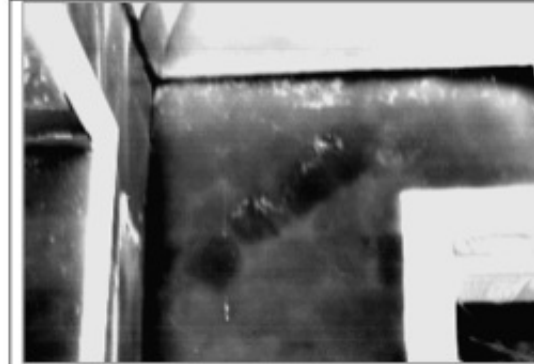


Fig. 9 – Arco sulla parete C



Fig. 10 – Fessure verticali

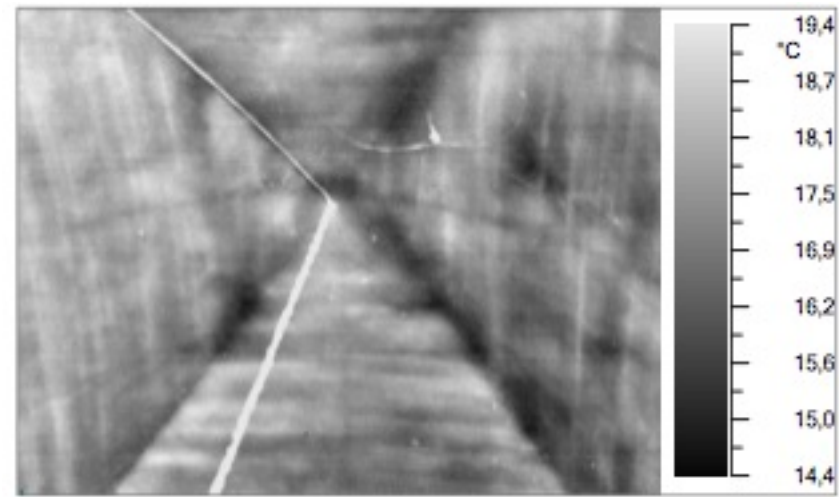


Fig. 11 – Pannelli in incannucciato
Le indagini multispettrali hanno permesso di evidenziare molti dettagli della struttura costruttiva e dello stato di conservazione delle superfici, che si sono dimostrati fondamentali per la conoscenza dell'edificio e per la conferma dei dati storici ricavati dalla ricerca archivistica e bibliografica. La documentazione ottenuta mediante diagnostica preliminare ha permesso di individuare le priorità di

intervento e di ottimizzare le risorse per limitare gli effetti del degrado già in atto e prevenire possibili sviluppi delle patologie presenti. Sulle superfici pittoriche è stato sperimentato un videomicroscopio portatile da cantiere, con lo scopo di effettuare una prima caratterizzazione dei materiali in loco, in particolare di intonaci e strati pittorici.

Al fine di contestualizzare i dati forniti dall'analisi termografica e comprendere meglio eventuali fenomeni legati ai fattori microclimatici, è in corso il monitoraggio di temperatura e umidità relativa in due punti considerati particolarmente significativi. A completamento delle indagini diagnostiche non distruttive precedentemente descritte sono stati prelevati alcuni campioni di materiale in facciata, da

analizzare con tecniche di laboratorio. I punti di prelievo sono stati scelti in base alla finalità delle indagini, volte sia alla caratterizzazione dei materiali che ad approfondire alcune tematiche di degrado, in particolare la presenza di alterazione cromatica su alcune parti di superficie dipinta.

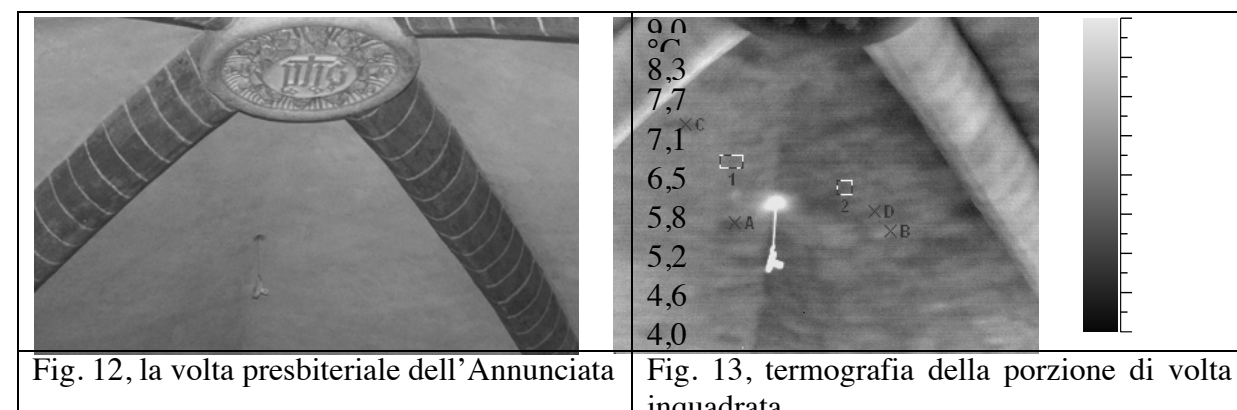
Valutazione delle finiture e monitoraggio del microclima per l'analisi delle aree a rischio

La ricerca ha avuto come punto di partenza l'osservazione sperimentale di differenti comportamenti igroscopici di diverse finiture della stessa malta, per elevati tassi di UR e basse temperature ambientali: la tessitura ottenuta con strumenti a lama corrisponde a superfici più compatte, che costituiscono le zone in cui avviene più frequentemente la condensazione di vapor acqueo; le aree che sono state trattate con utensili più morbidi presentano una finitura che favorisce l'assorbimento e l'evaporazione. Nel caso di continuità tra i diversi tipi di trattamento di finitura, i bordi della superficie più ruvida (e che, nel caso di stuccature, circondano la parte più compatta della stuccatura) sono interessati dal maggior degrado (6). Nelle malte di restauro, gli operatori usano entrambe le tipologie di strumenti, esclusivamente in funzione della dimensione dell'intervento e dell'effetto estetico finale.

Il precoce riconoscimento di queste zone a rischio, per mezzo di Termografia all'infrarosso (IRT), è di grande interesse per la conservazione, soprattutto nei molti casi in cui non ci sia un controllo dei parametri microclimatici, e un progresso per le tecniche di restauro delle superfici di pregio. Come già esposto in precedenti pubblicazioni, esiste una correlazione tra caratteristiche ottiche e di assorbimento d'acqua (7) e quindi il riconoscimento di eventuali discontinuità della superficie, dovute al trattamento finale, costituisce un elemento di valutazione della maggiore esposizione al rischio di degrado. Inoltre occorre considerare che la geometria dei volumi che costituiscono lo spazio interno gioca un ruolo molto importante nella meccanica degli spostamenti delle masse d'aria, sottoposte a variazioni di temperatura e umidità indotte da ventilazione naturale e conduzione delle murature.

Chiesa dell'Annunciata ad Abbiategrasso

Nel caso di studio, la concomitanza del monitoraggio microclimatico, ottenuto mediante sonde fisse collocazioni all'interno dell'edificio (estradosso e intradosso volta presbiteriale, abside) e all'esterno, prove psicrometriche e termografiche, ha permesso di determinare i meccanismi di distribuzione di UR e T° all'interno del vano presbiteriale, e soprattutto a ridosso delle superfici degli affreschi e della volta, oggetto di un recentissimo restauro. Le misure effettuate nell'arco di un anno solare hanno inoltre permesso di stabilire i valori soglia per modificare le condizioni climatiche interne senza creare sbilanci dannosi per la conservazione delle superfici.



Le riprese termografiche sono state effettuate in modalità attiva. L'analisi termica ha messo che le zone in cui la temperatura superficiale è inferiore, per morfologia della tessitura, possono essere considerate a rischio di condensazione nel caso di elevati tassi di umidità ambientale e temperature basse, condizioni risultate frequenti dal monitoraggio.

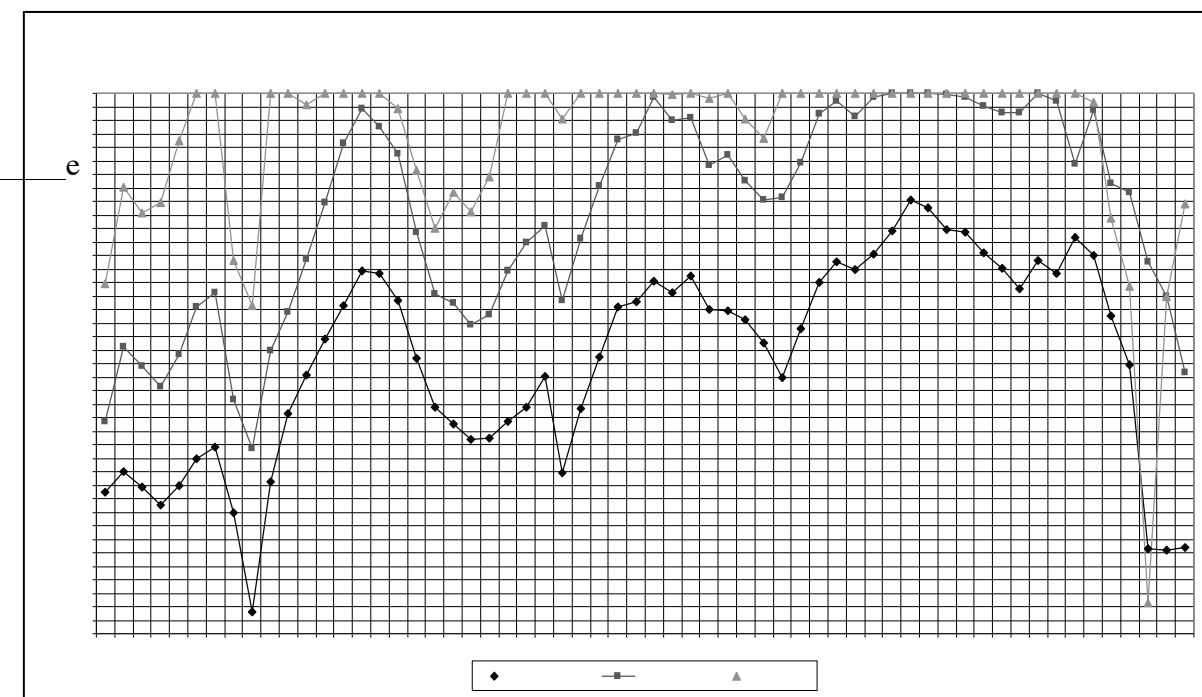


Fig. 14, grafico dell'andamento medio giornaliero di UR tra settembre e novembre 2005

L'analisi dei risultati che si sono ottenuti mediante monitoraggio microclimatico e prove psicrometriche può essere sintetizzata nei seguenti punti:

- 1) nell'edificio vi sono zone che si trovano a temperatura e UR differenti per buona parte dell'anno solare, in buona sostanza l'edificio presenta parti che per morfologia e per orientamento raggiungono valori ambientali differenti (dell'ordine di 2-3 °C e dei 10-15%), in condizioni naturali, senza quindi alcuna sollecitazione artificiale
- 2) il ritardo che si registra tra variazioni esterne e variazioni interne indotte è anch'esso variabile nelle diverse zone esaminate (questi risultati sono però stati pesantemente influenzati dalla presenza del cantiere, e quindi dall'apertura di porte e finestre sia durante le misure, sia per buona parte delle giornate)
- 3) le superfici interne sono state così soggette a numerosi e notevoli sbalzi termici, che mettono a serio rischio la conservazione degli affreschi e degli intonaci.
- 4) la zona più problematica è risultata l'intradosso della volta, ove si registra costantemente un umidità elevata sino ai livelli di saturazione
È da aggiungere che nell'intradosso l'aria più umida permane più a lungo rispetto alle altre zone dell'edificio, nonostante si registrino sensibili diminuzioni all'esterno e nelle altre parti dell'edificio, soprattutto nell'abside.
Nell'intradosso si generano perciò sacche di aria più umide che ristagnano fino a 48-60 ore più a lungo rispetto alle altre zone in cui è avvenuto il monitoraggio e sussistono tutte le condizioni perché si generino fenomeni di condensazione sulle aree che risultano più fredde. E' infatti da osservare che, dopo il recente intervento di restauro, nell'autunno 2005 (in cui sono stati registrati elevatissimi tassi di UR), sono comparse macchie giallastre proprio nella parte sommitale della volta, dove i materiali in opera presentano caratteristiche igroscopiche (in superficie) differenti (malte di restauro e finiture già in opera prima del restauro) ed infine, ove sono stati individuati ponti termici dovuti alla tessitura muraria
- 5) I periodi più critici sono risultati: quello autunnale/invernale, da novembre sino alla fine di gennaio, in cui le temperature rimangono pochissimi gradi sopra o sotto lo 0°C, anche con rischio di cicli di

cristallizzazione dell'acqua liquida negli strati più superficiali delle finiture. In questo periodo l'UR media assume valori mai inferiori al 68%, più frequentemente essi sono compresi tra il 78 e il 90%. Le temperature subiscono un graduale, ma sensibile aumento a partire da febbraio, ma è solo alla fine di aprile che i valori di UR rientrano finalmente entro quelli prefissati per la conservazione ottimale delle superfici intonacate (50-60%).

Considerando l'andamento annuale, si può concludere che le superfici siano giunte all'equilibrio con condizioni ambientali di elevatissima umidità. Occorrerà considerare questi valori per indurre qualsiasi variazione dei parametri ambientali, poiché una rapida variazione dell'UR e della Temperatura potrebbe condurre ad una veloce evaporazione e quindi alla vanificazione dei risultati ottenuti nel recente intervento di restauro.

L'edificio presenta una vulnerabilità intrinseca, dal punto di vista della conservazione delle superfici, per la morfologia della volta presbiteriale e per la disposizione delle aperture presenti. Si rende necessario studiare una ventilazione adeguata soprattutto per il presbiterio, avendo cura di verificare l'efficacia in particolare alla quota dell'intradosso.

E' opportuno prevedere un sistema di deumidificazione/umidificazione dell'aria e di regolazione della ventilazione, che siano funzionanti per tutto l'anno solare, e si auspica il proseguimento del monitoraggio e delle misure microclimatiche per controllare il delicato periodo di messa a regime dei sistemi di riscaldamento e ventilazione installati durante l'intervento di restauro.

Infine, si osserva che una coibentazione dell'estradosso della volta, potrebbe migliorare le condizioni di sbilancio termico dovute alla tessitura che sono state osservate mediante termografia attiva, riducendo i fattori di rischio di condensazione sulle superfici dell'intradosso.

Valutazione del regime termico delle murature e pavimentazione: condensazione e risalita capillare

Come già osservato, in ambienti non climatizzati, in condizioni climatiche severe (basse temperature ed elevata umidità) la presenza di superfici che presentano anomalie termiche implica fattori di rischio per la conservazione delle loro finiture. Nel caso di pavimentazioni, senza intercapedini o vespai, la temperatura del terreno influenza direttamente la temperatura superficiale di tali rivestimenti. Durante l'inverno, e soprattutto nelle stagioni intermedie, quando si verifica un elevato gradiente termico tra la temperatura della superficie e quella ambientale, nonché un elevato incremento dell'umidità ambientale, si assiste ricorrentemente alla condensazione di vapor acqueo, e, in fase di evaporazione, alla ricristallizzazione dei sali. Pertanto si genera un degrado differenziale sulle aree più fredde: la pavimentazione e, per conduzione, la base delle murature, direttamente a contatto con la pavimentazione. Per distribuzione e localizzazione tale danno potrebbe essere facilmente associato a umidità di risalita.

Ovviamente gli interventi risolutivi sono molto diversi nel caso di umidità per condensazione e per risalita, e diventa pertanto cruciale la corretta diagnosi: l'integrazione di termografia all'infrarosso, per la determinazione dei gradienti termici superficiali, di prove gravimetriche e del monitoraggio ambientale consentono di discernere le differenti cause di degrado. Particolare rilievo acquista l'indagine, nel caso di pavimentazioni di pregio e storiche, e quindi nel processo decisionale per la conservazione materica, sostanziale, delle superfici. Non da ultimo, la mappatura delle temperature superficiali di pavimentazioni e murature, consente di individuare le zone critiche a valle del restauro, e quindi di progettare un adeguato piano di conservazione programmata.

La procedura di prova, come già illustrata in precedenti pubblicazioni (8), ha le caratteristiche di un monitoraggio, un controllo nel tempo, per poter cogliere le eventuali variazioni indotte dalle escursioni termiche diurne/notturne, e dal mutare di temperatura e umidità ambientali nel corso delle stagioni.

Allo stato attuale della ricerca, si è in fase di elaborazione dei primi risultati ottenuti dai casi di studio che sono l'Oratorio dei Santi Caterina ed Ambrogio a Solaro e la 12° cappella del Sacro Monte di Ossuccio (CO). Gli edifici selezionati sono di dimensioni limitate, e solo a Solaro si ha uno sporadico e saltuario accesso di persone. Non esistono impianti di climatizzazione. Le superfici interne sono di pregio e, nel caso di Ossuccio, anche la pavimentazione ha un ruolo fondamentale, come imitazione

scenografica del Golgota, nell'apparato decorativo dell'intera cappella. La successiva fase di ricerca consisterà nella simulazione virtuale delle variazioni degli scambi termici tra pavimentazione e muratura, in funzione delle molte soluzioni progettuali per la predisposizione di impianto di riscaldamento.

Conclusioni

I risultati ottenuti mediante l'integrazioni di più metodologie diagnostiche non distruttive ha permesso di raggiungere gli obiettivi di identificare le differenze di materiali e finiture, anche secondarie, che possono avere comportamenti differenti se sottoposti a variazioni microclimatiche, registrare le variazioni al contorno, identificare gli effetti causati da tali variazioni.

I casi di studio presentati illustrano come sia possibile ottenere le informazioni necessarie alla conservazione dei materiali in opera, anche in attesa di un intervento di restauro, se le condizioni al contorno sono note e se vengono mantenute entro i valori che minimizzano eventuali sbilanci termoisolometrici. La conoscenza dei punti di discontinuità termica ed igrometrica permette di progettare interventi tempestivi, che riducono, o addirittura prevengono, l'insorgere del degrado.

Infine, le campagne che sono state effettuate nella fase sperimentale delle ricerche, hanno avuto costi molto contenuti, quantificabili entro le poche migliaia di euro. La possibilità di incidere molto modestamente sui già ridotti budget per la manutenzione ordinaria, fa sì che le procedure indicate costituiscano un'effettiva possibilità di tenere sotto controllo la maggior parte del patrimonio storico diffuso, e quindi di praticare la prima forma di conservazione preventiva in modo sistematico ed efficace.

BIBLIOGRAFIA

1. S. Della Torre, "Manutenzione" o "Conservazione"? La sfida del passaggio dall'equilibrio al divenire, in *Ripensare alla manutenzione. Ricerche, progettazione, materiali, tecniche per la cura del costruito*, atti del XV convegno Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 29/6-2/7/99, a cura di G. Biscontin e G. Driussi, Venezia, Arcadia ricerche, 1999, pp. 71-80
2. *Architettura e approccio sistemico*, a cura di V. Di Battista, G. Giallocosta, G. Minati, Monza, Polimetrica, 2006
3. S. Della Torre, *Riflessioni sul principio di compatibilità: verso una gestione dell'incompatibilità*, in *Dalla Reversibilità alla Compatibilità*, atti del convegno (Conegliano, 13-14 giugno 2003), Firenze, Nardini, 2003, pp. 27-32
4. S. Della Torre, E. Rosina, M. Catalano, C. Faliva, G. Suardi, A. Sansonetti, L. Toniolo, *Early Detection and Monitoring Procedures by Means of Multispectral Image Analysis*, ART 2005, Lecce 2005
5. G. Suardi, E. Rosina, S. Della Torre, V. Pracchi, N. Ludwig, V. Redaelli, A. Sansonetti, R. Negrotti, *Le indagini multispettrali per il riconoscimento delle malte di restauro*, XXI Convegno internazionale Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 12/7-15/7/99, a cura di G. Biscontin e G. Driussi, Venezia, Arcadia Ricerche 2005, pp. 907-915
6. E. Rosina, S. Della Torre, S. D'Ascola, S. Caglio, *Restauri a rischio: Microclima e differenze superficiali dei materiali in opera*, Conferenza Nazionale PND, Milano 2005
7. N. Ludwig, E. Rosina, *Restoration mortars at IRT: optical and hygroscopic properties of surfaces*, 8th International Conference QIRT 2006, Padova 2006
8. V. Pracchi, E. Rosina, *Effetti della temperatura superficiale della pavimentazione sul degrado dei rivestimenti e sul microclima*, XXII Convegno internazionale Scienza e Beni Culturali, Bressanone 2006 (in corso di stampa).

9. UN CICLO DEL CINQUECENTO O UN AMBIENTE DELL'OTTOCENTO? INDAGINI PROPEDEUTICHE AL RESTAURO DEL SALONE DI ULISSE NELLA PALAZZO DELLA PROVINCIA DI BERGAMO

Emanuela Daffra (1), Roberta Grazioli (2), Elisabetta Rosina (3), Lucia Contessi (4)

- (1) Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici di Milano, (2) Restauratrice (3) Dip. BEST, Politecnico di Milano, (4) Libero professionista

ABSTRACT

In the last years, Istituto Centrale del Restauro (ICR) consulted the periodical inspection of the the frescoes in *Salone di Ulisse* at Provincia di Bergamo Palace. Resulted decay is mainly due to the deformation of the supporting canvas. In 2007 Ministero per i Beni e le Attività Culturali and Provincia di Bergamo allocated

financial support for the restoration. Between 1551 and 1553, Giovanni Battista Castello painted the frescoes in Villa Lanzi, Gorlago. The decoration remains one of the few complete cycle of his paintings in Italy, and it shows one of the few evidence of roman and northern style in Bergamo area. In middle 19° century, Villa Lanzi was a farm and this use could not fit with preservation requirements of frescoes. The owners donated the decoration to Bergamo city, and Antonio Zanchi removed the frescoes by cutting them in 29 pieces.

In 1869, the pieces were located in Provincia Palace and Carlo Rota (a set designer/painter) reproduced the frames which remained in Villa Gorlati. The intervention is one of the first experiment of frescoes removal and relocation. Since their relocation, frescoes did not underwent main modifications, therefore they are an important evidence of a pioneeristic phase of restoration in Lombardy. Restorators had to face nodal issues, in order to choose between preservation of the original supporting system and a more efficient modern system, tune the levels of cleaning of 16° and 19° century paintings, obtain a speed and safe disassembling. About this last point, authors set a preliminary map of fixed points, in order to study the least destructive removal of panels from painted frames. Infrared Thermography (IRT) significantly served in finding metallic braces, also by means of dynamic thermal analysis.

KEY-WORD: Frescoes removal and relocation, wooden frames, Provincia di Bergamo Palace, canvas deformation, G.B. Castello, IR Thermography

INTRODUZIONE

Da alcuni anni gli affreschi strappati che decorano il Salone cosiddetto di Ulisse presso il palazzo della Provincia di Bergamo erano sotto osservazione – con la consulenza dell'Istituto Centrale per il Restauro ora ISCR) - a causa delle evidenti deformazioni delle tele di supporto. Nel 2007 grazie ad un finanziamento del Mibac si è potuto avviare l'intervento di restauro, che verrà condotto anche con il sostegno della Amministrazione provinciale e del Comune di Bergamo. La parte più antica della decorazione è costituita da 29 pezzi di affresco di Giovanni Battista Castello strappati a cura di Antonio Zanchi dal salone a piano terra della Villa Lanzi di Gorlago. Il ciclo fu commissionato dalla famiglia Lanzi a Giovanni Battista Castello detto il Bergamasco e fu probabilmente eseguito tra il 1551 ed il 1553. L'impaginazione riprende celebrati modelli raffaelleschi fingendo un portico quadrilatero aperto sul paesaggio e riparato da un arazzo tirato da corde. Inconsueta è invece la trama iconografica, fondata sull'Odissea interpolata dalla versioni medievali delle Metamorfosi, finalizzata alla glorificazione pubblica della famiglia Lanzi, che prestava il salone al governo veneto: pare che nella sala avesse sede l'Ufficio dell'Estimo (1). Dalla scelta dei temi traspare infatti la celebrazione della supremazia delle doti

intellettuali e pacificamente costruttive sugli istinti bestiali di violenza e sulle arti della guerra. Le citazioni colte e le allegorie morali sono trattate con brio illustrativo e con gusto narrativo 'popolare' che aumentano il fascino e la godibilità dell'insieme, facendo della sala un esempio nodale della decorazione profana cinquecentesca che a Bergamo ha perduto tanti esempi. Gli affreschi godettero subito di grande fama, anche perché il loro autore, nato intorno al 1526 (2), condusse in realtà buona parte della sua fortunata carriera lontano da Bergamo (3). A metà Ottocento gli ambienti della villa erano destinati ad usi agricoli incompatibili con le antiche decorazioni, così l'allora proprietario, il principe Giovanelli, offrì in dono i dipinti al Comune di Bergamo che ne stabilì lo strappo e la destinazione nel nuovo Palazzo della Provincia, perpetuando in una delle sedi del governo della neonata nazione italiana il messaggio politico degli affreschi cinquecenteschi.

Lo strappo e la sua importanza

Dello strappo, sostenuto dal conte Secco Suardo, fu incaricato Antonio Zanchi. Tutte le partizioni decorative figurali, tanto delle pareti come del soffitto, sono state strappate e riapplicate su tela piuttosto sottile, montata su telai; i pannelli sono stati poi (1869) riposizionati nella nuova collocazione con viti e grappe metalliche attentamente mascherate. Attorno alle porzioni cinquecentesche lo scenografo Carlo Rota riprodusse le quadrature che erano rimaste nel salone di Gorlago con alcune varianti, motivate dalle diverse proporzioni della sala di destinazione e della diversa disposizione delle aperture, tanto che fu necessario aggiungere delle lunette e dei peducci e allargare alcune figurazioni. Si tratta quindi di uno dei primi, e per dimensione più notevoli, esperimenti di strappo e ricollocazione di un intero ciclo decorativo. Inoltre l'insieme dopo di allora non ha subito pesanti manomissioni e quindi è testimonianza cruciale di una fase pionieristica del restauro lombardo, infine pone storici e restauratori davanti ad un bivio: recuperare per quanto possibile le stesure di Giovan Battista Castello o riproporre la sala del 1869?

Note preliminari 1: tecnica esecutiva e condizioni di conservazione della pellicola pittorica

Qui di seguito si sintetizzano gli esiti delle prime osservazioni condotte sulle porzioni strappate. Tali osservazioni sono state condotte sul recto dell'intero ciclo, mentre per potere esaminare il verso è stata smontata una vela (cfr. tav. 1, elemento 3). L'intervento di strappo, per quanto ben eseguito, rende impossibile la corretta comprensione della tecnica esecutiva utilizzata dal Castello in tutte le sue fasi. La rimozione quasi totale delle tracce di intonaco ed arriccio dagli strappi consente poche considerazioni sulle stesure preparatorie. Alcuni residui, riconoscibili in corrispondenza delle figure dei guerrieri, individuano la presenza di uno strato di intonaco grigio, liscio, costituito da una malta di calce con inerti carbonatici a finissima granulometria e rari clasti silicatici: il rapporto inerti/legante sembra, in generale, equilibrato, anche se, in corrispondenza dei pennacchi, si riscontrano le tracce di un cretto largo ed irregolare prodotto da fenomeni di ritiro caratteristici della presenza di dosi eccessive di legante carbonatico. Lo strappo ha conservato le linee di incisione, eseguite con uno strumento dalla punta fine ed arrotondata, utilizzate per il riporto del disegno preparatorio mediante cartone. Lo strato di intonachino pittorico, analizzato a luce radente, rivela una tecnica differenziata tra l'esecuzione delle grandi figure (monocromi, pennacchi, riquadro della volta) e quelle decorative (lunette, vele): nel primo caso si riscontra una stesura più liscia, compatta ed omogenea, eseguita con l'intonaco ancora umido, mentre nel secondo appaiono evidenti le pennellate corpose applicate su di un intonaco asciutto o in fase avanzata di asciugatura (figg. 1, 2).



Fig.1 Stesure a fresco (guerrieri), Fig 2 Stesure a secco (vele)

Il disegno preparatorio è eseguito con una tinta grigio chiara su fondo bianco o, nella maggior parte dei casi, con una tinta rossiccia su priming rosso, con cui vengono anche impostate le ombre e realizzati i mezzi toni. Le stesure finali, più chiare, sono eseguite a corpo, mentre le lumeggiature, spesso a tratteggio (*Guerrieri*), sono ottenute con tinte più liquide, acquerellate. Su lunette e vele si riscontra un procedere più veloce,

abbozzato, con pennellate corpose applicate a secco sulla campitura di fondo, utilizzando grassello di calce, addizionato a rari grani di pigmento nero e terre per le campiture bianche e per i fondi chiari, e tinte fluide acquerellate per le cornici. L'osservazione ravvicinata, al di là delle patologie di degrado attualmente esistenti e chiaramente conseguenti alle operazioni di strappo ed alle condizioni di conservazione ad esse precedenti, sembra confermare quanto segnalato dal Vimercati-Sozzi nel 1866 che non vedeva alcuna *"assoluta imperiosa necessità"* al trasporto (4). Infatti le stesure pittoriche delle parti figurative, fatta eccezione per i due monocromi raffiguranti i *Guerrieri* dell'attuale lato nord (lato F), nonostante lo strappo appaiono prive di lacune significative e di evidenti tracce di fenomeni di degrado che potessero averle gravemente interessate in passato. Probabilmente meno conservati dovevano apparire i dipinti delle vele e delle lunette, in particolare quelle del lato nord. Qui infatti l'ampio ricorso a stesure a corpo applicate a secco doveva aver comportato il distacco per esfoliazione di queste finiture. Il fenomeno aveva interessato, in particolare, le campiture bianche e quelle verdi. Lo stesso degrado interessa le parti rosse, verdi e blu delle vesti delle *Muse* lungo il lato nord: è ipotizzabile che le operazioni di strappo abbiano causato la perdita delle stesure pittoriche più ammalorate ma è assai probabile che questa fosse comunque già in origine la zona più compromessa.

Note preliminari 2: tecnica di strappo

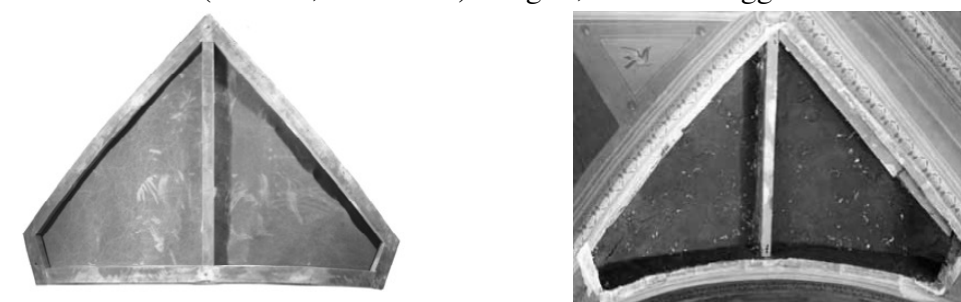
"..viene opportuno di ricordare la saggia deliberazione che fu presa da una Commissione incaricata di dirigere le opere di restauro dei magnifici affreschi di G.B. Castello, bergamasco ...". Nella relazione di quella Commissione infatti è detto: "Considerando che una pittura a fresco, la quale conti oltre tre secoli, non può essere perfettamente intatta come una nuova: considerando che lasciandola nel suo stato naturale non si fa che rispettare le leggi di natura, la Commissione determina che i freschi di G.B. Castello non saranno in alcun modo restaurati e nei pezzi mancanti si metterà una semplice tinta locale acciò la candidezza di quei fondi non offenda l'occhio del riguardante" (5). Accanto a queste indicazioni sulla presentazione finale cui doveva attenersi lo

Zanchi, nell'interpretare le tecniche di intervento possiamo appoggiarci su quanto prescrive il conte Secco-Suardo, principale promotore dell'iniziativa (6), amico ed insegnante dello stesso Zanchi che allo strappo degli affreschi dedica un intero capitolo, il terzo del suo manuale. Non stupisce dunque che dall'analisi condotta in questa occasione emerga una quasi totale fedeltà ai metodi proposti dal Secco Suardo: l'operazione ha interessato esclusivamente lo strato di intonachino pittorico,

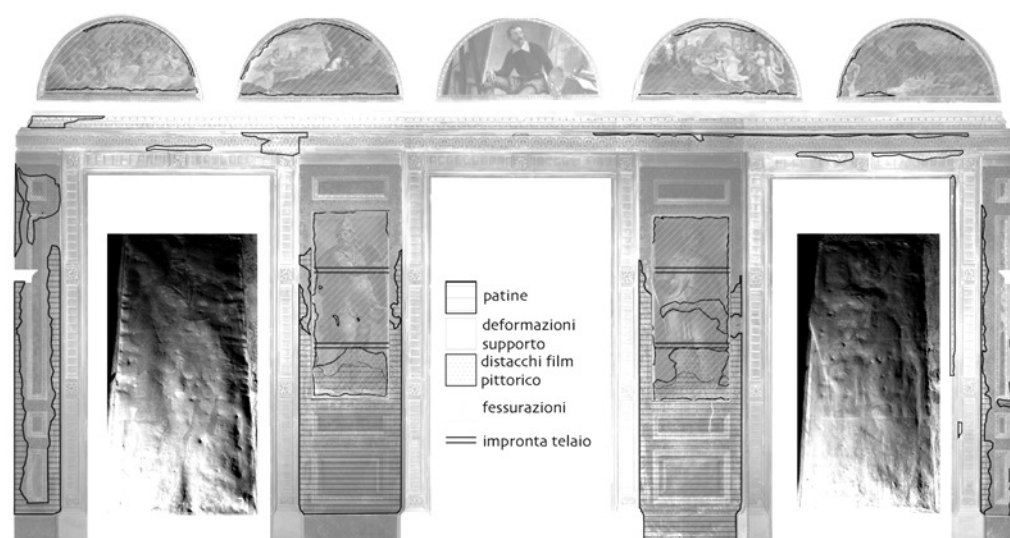
asportando con cura ogni residuo di arriccio, al fine di rispondere a quei requisiti di flessibilità e leggerezza ritenuti essenziali per la buona riuscita dell'intervento e la futura conservazione dell'opera *"essendo la leggerezza e la pieghevolezza qualità preziosissime"*. I dipinti sono stati strappati con colla forte e riportati su tela con un mastice di calce e caseina, probabilmente addizionato con latte e colla per renderlo più fluido e rallentarne la presa, evitando pericolose contrazioni: ancora una volta il riscontro è Secco Suardo che raccomanda l'impiego di due distinti adesivi *"Per seguire il trasporto di un fresco sono necessarie due qualità di colle: l'una che serva a trar seco la pittura, l'altra a mantenerla assicurata alla tela. La prima deve essere solubile nell'acqua affinché si possa con facilità ammolire allorchè devesi ritogliere dalla pittura la tela che vi si applicò. L'altra invece deve essere insolubile nell'acqua, affinché non si ammolisca allorquando staccasi la tela interinale."* (7).

La maestria dello Zanchi fa sì che l'intervento riesca perfettamente: le stesure pittoriche appaiono, nel complesso, piuttosto integre, conservando il proprio corpo, le tracce di incisione e numerose velature superficiali, questo nonostante che la presenza di stesure a secco ponga il ciclo pittorico fra i casi di strappo più ardui, per i quali Secco Suardo consiglia di informare il committente circa il rischio di perdita delle finiture sensibili all'acqua. Oltre alle già citate vesti delle *"Muse"*, paiono estremamente abrasivi gli intonaci delle vele a fondo bianco, ove affiora evidente il mastice di caseato. Quest'ultimo è stato opportunamente pigmentato con una tinta bruna al fine di evitare vistose interferenze, con alterazione dei rapporti visivi tra il mastice stesso e la superficie originale.

Fig. 3, telaio di una vela (v. tav.I , elemento3) e Fig. 4, vano di alloggiamento con controtelaio in sede



Lo smontaggio di una vela ha consentito di verificare l'impregnazione del supporto con l'adesivo di caseato marrone che costituisce così un fondo scuro, meno invasivo nei confronti dell'immagine pittorica. L'impregnazione appare controllata, omogenea, senza grossi accumuli, lasciando percepire l'armatura del tessuto. Dal recto si osserva la velatura delle abrasioni maggiori in cui affiora il mastice, con la medesima tinta. Il procedimento corrisponde precisamente a quanto indicato dal Secco Suardo e rispetta le richieste prima citate di ridurre le interferenze visive limitando al massimo le integrazioni. L'osservazione al microscopio ha consentito di individuare sulla vela analizzata piccole gocce rossastre e cristallizzate sulla superficie. Ad esse si accompagnano un forte irrigidimento del supporto e la presenza di una generale alterazione cromatica aranciata, che si manifesta con la traccia di larghe pennellate irregolari. E' possibile che si tratti di una stesura di gomma lacca, applicata dallo stesso Zanchi, a prima vista solo sulle porzioni più compromesse, come ulteriore consolidante. Le opere sono state trasportate su pezze di tessuto di lino ad armatura a tela, a tessitura piuttosto rada, come da prescrizioni. L'irrigidimento strutturale è stato ottenuto applicando da tergo piccoli tasselli di tela ancorati alle traverse ed alla tela con mastice di caseato mimetizzato grazie alla tinta bruna. Gli strappi sono stati poi fissati a telai di legno d'abete, fissi, muniti di traverse e di spessore consistente (cm 4): al fine di isolare il più possibile le opere della volta dall'umidità e, nello stesso tempo, di stabilizzare la loro collocazione, nella nuova sala si erano creati vani di alloggiamento piuttosto profondi, finiti con una stesura catramosa e provvisti di un controtelaio fissato a parete, che creava una sorta di camera



d'aria (figure 3 e 4). Tale metodo di montaggio non pare riguardare i monocromi e le lunette a parete, che paiono avere telai sottili e, di conseguenza, incassi esigui.

Fig. 5, rilievo macroscopico del degrado e particolari delle deformazioni del supporto degli strappi monocromi

Stato di conservazione

La quasi totalità delle tele è interessata da problemi di perdita di tensione e deformazione della superficie, e ciò sottopone a gravi sollecitazioni la sottile pellicola pittorica, con conseguenti danni meccanici concentrati nelle zone di maggiore deformazione (prevalentemente lungo le parti basse) e lungo i margini. Da questo punto di vista si tratta di un equilibrio ormai giunto al limite: non si sono ancora manifestati danni irrimediabili ed irreversibili, ma le tele di supporto sono irrigidite, deformate e fragili. Ogni ulteriore variazione porterebbe strappi e perdite della pellicola pittorica. Naturalmente poi l'intera superficie è offuscata da depositi scuri e disomogenei di partecellato.

Problemi posti dall'intervento

Intervenire su di una situazione così particolare e stratificata ha presentato, oltre alle consuete problematiche tecniche, aspetti critici peculiari che si indicano sinteticamente:

- lo strappo degli affreschi è stato un intervento pionieristico nella storia del restauro. Era perciò necessario decidere se privilegiare una conservazione ottimale delle tele – che imponeva la sostituzione dei telai - o un mantenimento dell'insieme come integrale testimonianza anche materiale non solo della storia del 'Salone di Ulisse' ma anche di una specifica stagione del restauro
- l'accostamento tra le parti cinquecentesche, che dai tasselli di pulitura effettuati in anni passati mostrano una cromia fredda e brillante, e parti ottocentesche probabilmente più scure porrà la questione dei livelli di pulitura da privilegiare
- l'utilizzo costante della sala anche come luogo di riunioni impone la conoscenza delle attuali condizioni microclimatiche e per il futuro il mantenimento di un equilibrio che garantisca, insieme, la buona conservazione delle opere e un minimo di confort agli utenti.

Inoltre, ed è problema di natura diversa, la complessità ed anche la qualità dell'intervento ottocentesco nel suo complesso impongono di rendere il meno invasivo possibile lo smontaggio delle singole parti, le cui committiture sono attentamente mimetizzate da sottili stuccature dipinte. Tutto ciò ha reso indispensabile acquisire il maggior numero di dati possibili sulle condizioni complessive del locale e sulle modalità di fissaggio dei telai all'orditura lignea del soffitto utilizzando modalità non invasive.

LE INDAGINI TERMOGRAFICHE

L'uso della Termografia all'infrarosso termico (IRT) si è dimostrato particolarmente efficace ed è stato utile non solo per rilevare il sistema di supporto degli affreschi ma anche per localizzare zone di particolare degrado.

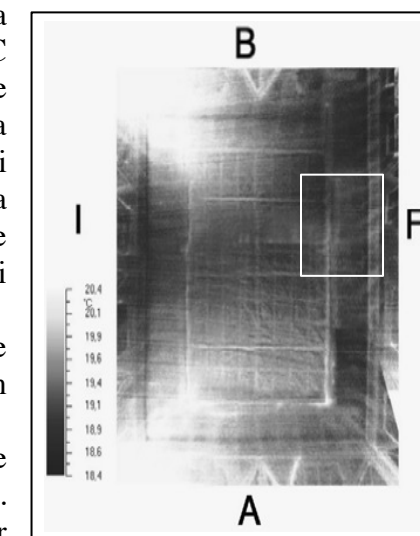
Modalità

La localizzazione di strutture non a vista mediante IRT è possibile solo se la differenza delle proprietà dei materiali induce una distribuzione delle temperature superficiali variabile. Il flusso di calore viene provocato da un'opportuna sollecitazione termica.

Nel caso delle indagini al Salone di Ulisse la durata e modalità di riscaldamento e ripresa sono state basate sulla letteratura scientifica e sui modelli di calcolo già predisposti in precedenti esperienze (8). Lo spessore degli affreschi e del loro supporto è stato presunto di 0.4 cm. Gli affreschi sono ancorati a telai, che a loro volta sono fissati all'intradosso della volta: lo spessore dei telai lignei è di circa 5/6 cm. Sono state eseguite due battute termografiche mentre era in funzione il riscaldamento (termosifoni) (9). A seguito dell'indagine preliminare, che è servita a valutare le aree in cui si verificava un maggior sbilanciamento termico, si è proceduto con una seconda battuta, al fine di localizzare il sistema di aggancio degli affreschi ai telai. In base all'indagine preliminare si è scelta un'area campione in cui gli affreschi fossero ben aderenti ai telai, si misurasse il maggior gradiente termico tra intradosso ed estradosso, e dove minori fossero gli apporti di calore dovuti alla presenza dei termosifoni. Per queste ragioni si è optato per il lato F, e si è scelta la metà verso il lato B (figure V volta e lato F verso B). Nella seconda battuta si è utilizzato un riscaldamento localizzato alla zona di indagine e opportunamente applicato per mettere in evidenza gli elementi ricercati: mediante convezione si è ottenuto un rapido riscaldamento di circa 5°C limitato alla piccola porzione della superficie in esame. Su quest'area si è proceduto alle riprese a distanza ravvicinata (circa 1 m) mediante l'uso di un ponteggio mobile. In questo modo è stato possibile ottenere una risoluzione geometrica di circa 0.2 cm per pixel (si è ipotizzato che gli agganci metallici da rilevare avessero un diametro di circa 0.5 cm). La mappatura, ottenuta con approccio attivo, ha consentito il rilievo di numerose anomalie termiche che potevano corrispondere agli oggetti in esame. Si è quindi applicata una procedura di analisi termografica dinamica ad alcune aree rappresentative, per valutare quantitativamente gli incrementi di Temperatura (T°C) delle zone in cui si è identificato il telaio e il possibile aggancio metallico, paragonandoli all'incremento di T°C della tela. Tale metodo ha richiesto la ripresa di due sequenze di immagini termografiche, acquisite con frequenza di 10 secondi, per la durata di 180 secondi in fase di riscaldamento, e di 360 secondi in fase di raffreddamento, secondo le procedure già pubblicate in precedenti studi (10). Infine, le anomalie termiche che per dimensioni, incremento di T°C, e localizzazione potevano corrispondere agli elementi ricercati sono state verificate mediante un cercametri. A esemplificazione del metodo impiegato si riportano i risultati ottenuti dalle scansioni del lato F nella prima e nella seconda battuta (11).

Risultati

Il mosaico dei termogrammi mette in evidenza alcune anomalie termiche dovute al riscaldamento non omogeneo del locale. Inoltre si notino gli effetti dovuti alla mancanza di tenuta dei serramenti delle finestre, che permettono l'entrata di un flusso di aria più fredda proveniente dall'esterno, che è causa di una diminuzione della T°C superficiale appena sopra le porte finestre. Nonostante la diseguale sollecitazione termica, è possibile distinguere nello specchio della volta i telai lignei che sostengono la tela su cui sono stati collocati gli affreschi, e che formano una griglia regolare, costituita da un'orditura principale ben evidente, e da una secondaria che suddivide l'interasse, e che risulta meno marcata. In aggiunta, si noti che i termogrammi permettono di rilevare le non planarità della superficie, che si presenta con rigonfiamenti e grinze dovute alla deformazione della tela di supporto agli affreschi non chiaramente percepibile ad occhio nudo. Infine si rileva la presenza di strutture regolarmente disposte, non aderenti alla superficie indagata, individuabili anche sotto la cornice dello specchio della volta. Sono particolarmente evidenti sul lato delle finestre a causa del maggior gradiente delle temperature tra intradosso ed estradosso della volta.



Si verificano qui maggiori dispersioni termiche rispetto agli altri lati del locale e quindi si ipotizzano condizioni di transitorio termico durante la ripresa. Le strutture individuate possono essere le centine lignee che armano la volta del locale, a cui è ancorato il telaio di supporto degli affreschi. Una ripresa effettuata nella seconda battuta, a distanza ravvicinata, permette di rilevare l'orditura dell'incan- nucciato in questa zona: l'immagine termo- grafica in tavola 2 (nella pagina a colori) si riferisce all'area inquadrata nel riquadro bianco di fig. 6, meglio visibile in fig. 7.

Fig. 6, mosaico dei termogrammi dello specchio centrale della volta: le vistose anomalie termiche sono dovute agli effetti del riscaldamento dei termosifoni, posti agli angoli della stanza

Prospetto F



Fig. 7, le lunette del lato F della volta, nei riquadri 1 e 2 sono individuate le zone esaminate nella seconda battuta, effettuata a distanza ravvicinata dal trabattello

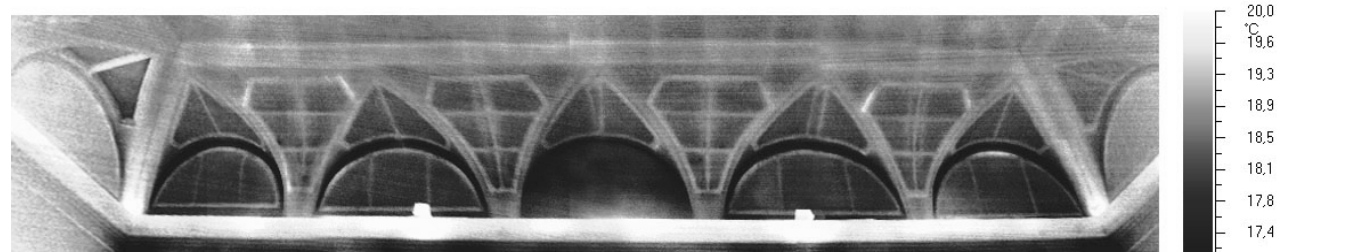


Fig. 8; vista d'insieme dei termogrammi del prospetto F (lato delle finestre)

Il mosaico dei termogrammi permette di apprezzare nel suo insieme la struttura di supporto degli affreschi. Su questo lato, dove gli sbilanci termici dovuti al riscaldamento sono meno evidenti, si può rilevare con maggiore precisione sia l'orditura della struttura secondaria a cui sono ancorati gli affreschi, sia la struttura dello specchio della volta, che risulta non perfettamente aderente alla superficie decorata, sia la centinatura sottostante. Inoltre si noti che nella lunetta centrale non si rileva alcun supporto, come accade anche per le lunette dei lati A e B inquadrare in questa immagine. Su questa lunetta si rileva un gradiente termico pronunciato tra la parte superiore e la base (circa 2°C) che corrisponde alla non perfetta adesione tra la lunetta e l'unghia soprastante. Si realizza quindi un ponte termico di notevole entità. La seconda battuta è stata applicata alle zone 1 e 2 di fig. 7. Si riportano per brevità i risultati dell'analisi sull'area 1.

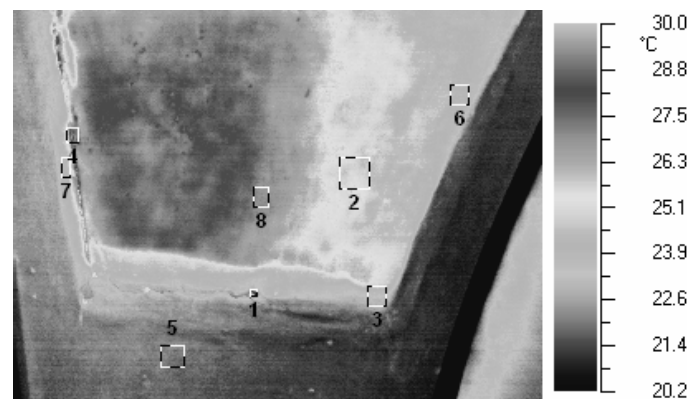


Fig. 9, le zone su cui si è effettuata l'analisi quantitativa con approccio dinamico; il termogramma è stato scattato durante il riscaldamento a 30 secondi dall'inizio

Area 1

Nell'area 1 si è utilizzato l'approccio dinamico per la valutazione dell'incremento di Temperatura in fase di riscaldamento in alcune aree considerate significative dalla precedente battuta termografica. In particolare è stato calcolato l'incremento di T°C in una zona campione non ammalorata dell'affresco su tela (T2), affresco su tela danneggiato (distacco, T4), affresco su tela sovrapposto ad alcune parti del telaio (montante verticale, T8; telaio sottoposto a riscaldamento diretto, T7; telaio orizzontale sottoposto a riscaldamento indiretto, T3; telaio non sottoposto a riscaldamento localizzato, T6), e la piccola area in cui è stata identificata l'anomalia termica che è stata ipotizzata corrispondente all'aggancio metallico al telaio sottostante (T1). Infine, l'analisi è stata effettuata per paragone anche su di un'area della muratura intonacata, sottoposta allo stesso riscaldamento (T5). I risultati sono rappresentati nei grafici successivi.

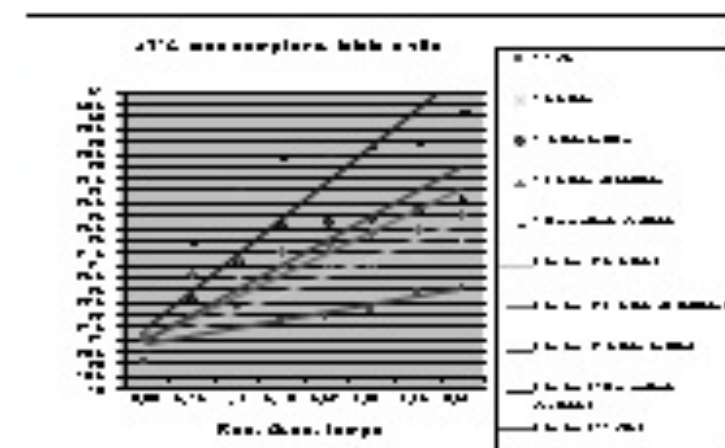
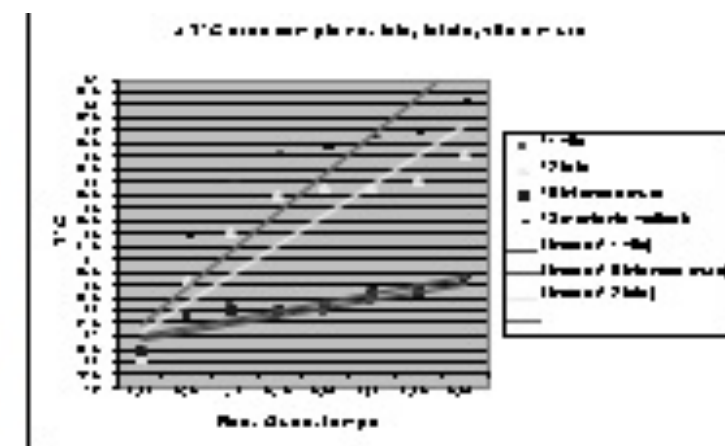


Fig. 10, grafico dell'incremento di temperatura delle aree T1, T2, T5, T8; Fig. 11, grafico dell'incremento di Temperatura delle aree T1, T3, T6, T7, T8, che permette di confrontare il comportamento termico tra la zona dell'aggancio metallico e le diverse parti del telaio

Come si evince dal grafico, le quattro aree già all'inizio del riscaldamento presentano temperature differenti, a causa del gradiente termico che si è generato tra l'intradosso della volta (si ricorda che il locale è riscaldato) e l'estradosso, in prossimità della parete esterna F. Nel grafico si nota che

l'incremento di temperatura della tela è molto rapido, e si raggiungono temperature molto superiori rispetto all'area dell'aggancio metallico. La zona di affresco aderente al montante verticale, che è stato oggetto al flusso convettivo diretto, presenta un incremento di temperatura ancora maggiore, poiché il montante in legno sottostante impedisce al calore di propagarsi velocemente attraverso l'affresco. Infine si noti che il comportamento della muratura e quello dell'aggancio metallico sono molto simili: nonostante la temperatura iniziale sia di circa 0.5°C maggiore sulla muratura, al termine del riscaldamento si raggiungono valori molto simili. Il grafico di fig. 10 mette in evidenza che, nelle condizioni di ripresa in cui la prova è stata effettuata, è sempre possibile distinguere il comportamento termico della zona in cui si è rilevato l'aggancio metallico da quello di ogni parte dell'affresco sovrastante il telaio ligneo. Infatti, nonostante il riscaldamento differenziale del montante verticale (lungo il quale si è applicato direttamente il flusso convettivo), della parte non riscaldata direttamente e della zona in cui è comunque arrivato un flusso di calore trasversale risultante dal riscaldamento applicato localmente, l'incremento di Temperatura dell'area T1 risulta sempre inferiore rispetto alle altre zone dell'indagine.

In base all'analisi termica effettuata, è stato possibile ottenere una mappatura dei termogrammi registrati con modalità attiva sulle prime tre lunette del prospetto F, come illustrato nelle figure seguenti. In base ai dati ottenuti con IRT e validati mediante cercametri, è stato possibile giungere ad una ricostruzione della posizione degli agganci metallici per gli elementi della lunetta e delle porzioni tra una lunetta e l'altra. Lo schema in fig. 12 li rappresenta.

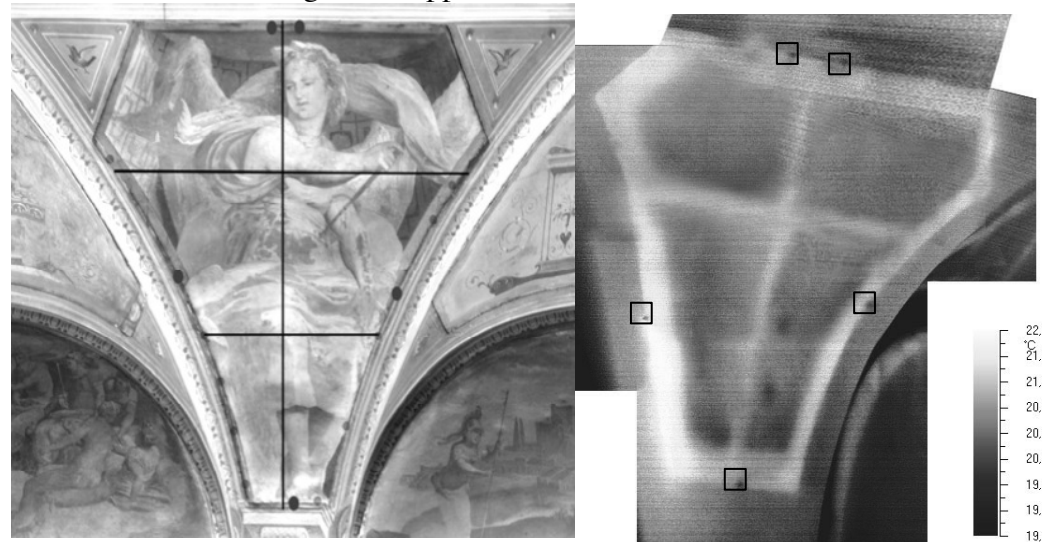


Fig. 12, prima vela a contare da sinistra, schema degli agganci rinvenuti mediante IRT (cerchi neri e grossi) e cercametri (cerchi grigi e piccoli), e fig. 13, mosaico dei termogrammi. Gli agganci metallici sono posti in maggior numero lungo la base superiore del telaio, mentre nei lati e nella base inferiore si conta un solo elemento

CONCLUSIONI

L'indagine preliminare che è stata effettuata ha avuto esito positivo nell'individuare la struttura portante degli affreschi e della volta. Inoltre sono state poste in evidenza alcune patologie che affliggono la superficie degli affreschi, quali distacchi dal supporto, deformazioni della tela, probabili distacchi della pellicola pittorica e/o lacune. Sono inoltre risultate evidenti le dispersioni termiche dovute all'esposizione del lato esterno della sala, la mancanza di tenuta dei serramenti, e probabili dispersioni termiche dell'impianto elettrico che alimenta il sistema di illuminazione all'imposta della volta. Infine, il riscaldamento della sala è risultato poco omogeneo, e sono state localizzate le aree di maggior sbilancio termico.

L'approccio di analisi dinamico ha dimostrato la sua validità nel consentire di ottenere un chiaro riconoscimento delle zone ricercate, un'identificazione sicura degli agganci metallici non a vista, e, come dimostrato, soprattutto le sequenze in fase di raffreddamento permettono anche di poter distinguere la localizzazione di tali agganci nonostante la superficie dell'affresco si presenti danneggiata. Pertanto, procedendo all'analisi a distanza ravvicinata di una porzione significativa della volta si è potuto ricostruire il sistema di ancoraggio degli affreschi ai telai, localizzando i punti in cui viti/chiodi fissano le tele ai supporti.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E NOTE

- (1) M.Lorandi, *Il mito di Ulisse nella pittura a fresco del Cinquecento italiano*, Milano, Jaka Book 1996; G.Rosso Del Brenna, *Giovanni Battista Castello*, in "I Pittori Bergamaschi- Il Cinquecento II", Bergamo Poligrafiche Bolis s.p.a, 1976 pp.443-444.
- (2) Il luogo e la data di nascita del pittore non sono certi. Si veda da ultimo G.Petrò, *Giorgio e Giovanni Battista Castello nei documenti bergamaschi*, in Atti dell'Ateneo di Scienze, Lettere ed Arti di Bergamo, 64.2000/01(2002), p. 261-304 e per una posizione diversa Lorandi 1996 con bibliografia precedente.

- (3) P.Boccardo-C.Di Fabio, *L'attività di Giovanni Battista Castello il Bergamasco a Genova : un artista e la sua cultura tra Roma e Fontainebleau*, in P.Boccardo, a cura di, *Luca Cambiaso : un maestro del Cinquecento europeo*, Cinisello Balsamo, Milano, Silvana Editoriale 2007. pp. 85-111.
- (4) Citato in G.Piva, *L'arte del restauro : il restauro dei dipinti nel sistema antico e moderno ; secondo le opere di Secco-Suardo e del Prof. R. Mancina*, ed. cons. Milano Ulrico Hoepli, 1997, pp.257-58.
- (5) G.Piva cit, pp. 88-89.
- (6) G. Secco Suardo, *Osservazioni ad una opinione di Paolo Vimercati Sozzi*, tip. P. Agnelli, Milano 1866.
- (7) Così è riportato in Piva, cit 1997, pp.
- (8) E. Rosina, E. Grinzato, V. Vavilov, A. Grimoldi, E. Di Flumeri, V. Papetti, G. Roche, *Capturing The Building History by Quantitative IR Thermography*, in 3rd International Congress on "Science And Technology For The Safeguard of Cultural Heritage in The Mediterranean Basin", Alcalá de Henares (ES) 2001; E. Rosina, E. Grinzato, E. Robison, Mapping Masonry Bonding by Quantitative IR Thermography, Thermosense XXIV-An International Conference in thermal sensing and imaging, diagnostic applications, Orlando 2002.
- (9) Il gradiente termico tra interno ed esterno dell'edificio al momento dell'indagine è stato di circa 10-15°C.
- (10) N. Ludwig, E. Rosina, Dynamic IRT for the frescoes assessment, the study case of Danza Macabra in Clusone (Italy), in Thermosense XXVII, Proceedings of SPIE, Orlando 2005; E. Grinzato, P.G. Bison, S. Marinetti, V. Vavilov, Non-destructive evaluation of delaminations in fresco plaster using Transient Infrared Thermography, Research in Nondestructive Evaluation 5, pp. 257-271, Springer-Verlag ed., New York 1994; G. Schirripa Spagnolo, G. Guattari, E.Grinzato, P.G. Bison, D. Paoletti, D. Ambrosini, Frescoes Diagnostics By Electro-Optic Holography And Infrared Thermography, 6th World Conference on NDT and Microanalysis in Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage, Rome, 1999 May.
- (11) Dati ambientali: 27 dicembre 2007, interno: UR 29%, T 18°C; esterno: UR 50%, T 3.5°C; assenza di vento e di precipitazioni, cielo sereno; 25 gennaio 2008, interno, alla quota dell'imposta volta: UR 35%, T 19.5 °C; durante il riscaldamento per convezione si è generato un incremento della Temperatura dell'aria nell'area in esame di circa 6°C; esterno: UR 45%, T 6°C; assenza di vento e di precipitazioni, cielo sereno. Strumenti: termocamera Avio TVS 700 LW, (LW = 8:14 mm), camera fotografica Canon S80 Powershot, dotata di ottica 28-80 mm, sonde ambientali Lacross Technology, mod TX27TH-IT. Per la verifica degli elementi rilevati mediante termografia si è utilizzato un apparecchio DMO 10, Bosch. L'analisi dei gradienti termici si è svolta con software dedicato (Goralex Parallax, Thermography Studio 2003, Thermography Explorer 2003).

RINGRAZIAMENTI

Alle indagini ha collaborato Sara Razzitti e Tatiana Marangon. Il rilievo tridimensionale a scanner laser e la restituzione ortofotografica sono stati eseguiti dagli architetti Giorgio Peverelli e Emilio Colombo, ha collaborato Federica Battaglia. Per ICR hanno effettuato la consulenza le dottoresse Maria Carolina Gaetani dell'Aquila d'Aragona e Marie-Josè Mano; si ringrazia per la disponibilità a facilitare logisticamente le indagini e gli studi condotti la Provincia e Prefettura di Bergamo.

10. Indagini sulle problematiche conservative legate all'umidità

Elisabetta Rosina, Hugo Wilfredo Torres Reyna, Gloria Brocchi, Chiara Faliva, Simona D'Ascola
Politecnico di Milano, Dipartimento Best

1 Introduzione

L'interazione tra i manufatti in stucco e il sistema-edificio che li contiene è stata raramente indagata. Nel programma di ricerca di cui si forniscono qui sinteticamente gli esiti si è ritenuto di inserire l'analisi delle problematiche conservative legate all'umidità, sia in funzione dei casi studio interessati, sia con riferimento alla più generale finalità di contribuire alla stesura di protocolli metodologici per la conservazione.

Si sono perciò svolte sia indagini in situ che elaborazioni in laboratorio, anche se queste ultime sono state oggettivamente condizionate dalla impossibilità di prelevare campioni della necessaria consistenza. Le indagini sul sistema-edificio hanno riguardato in particolare le chiese di S. Lorenzo a Laino Intelvi e della Madonna del Restello a Castiglione Intelvi.

I materiali impiegati e le tecniche costruttive sono simili (muratura in pietrame e calce, aperture di limitate dimensioni, copertura a falde realizzata con orditura in legno e manto di copertura in cotto e pietra) e sono tutti dotati di un ampio e pregiato apparato decorativo all'interno, realizzato con materiali differenti, quali intonaci dipinti e stucchi. Gli edifici hanno diverse condizioni e tempi di utilizzo, e differiscono anche per la dotazione di impianti: la chiesa di Laino, regolarmente utilizzata per il culto, è soggetta a manutenzioni periodiche di diverso livello, e di un sistema di "sorveglianza" esercitato dagli stessi fruitori, ed è dotata di impianto di riscaldamento; la Madonna del Restello è un piccolo oratorio, frequentato raramente, senza impianto di riscaldamento, attualmente oggetto di un intervento, nell'ambito del progetto Interreg, che ha compreso la sistemazione del manto di copertura. I manufatti presentano degrado imputabile a diverse forme di umidità: le indagini diagnostiche sono state finalizzate all'individuazione delle cause e a stabilire le condizioni per la migliore conservazione dei materiali in opera. Le tecniche di indagine adottate rispetto ai due casi studio sono di carattere preliminare, svolte a sostegno della valutazione delle priorità per la conservazione e il progetto esecutivo dei primi provvedimenti e per i restauri esemplari previsti dal programma di ricerca.

2 Madonna del Restello

Il piccolo edificio si affaccia sul pendio al bivio della strada per Castiglione, il piano di calpestio ad una quota qualche metro sotto il livello stradale.

La pianta è ottagonale, ed è completata da una sacrestia addossata al lato destro.

Le murature esterne sono in pietra a vista, parzialmente intonacate; alla base vi è una zoccolatura di malta cementizia. All'interno le pareti sono decorate con affreschi, statue e cornici in stucco; il paliotto dell'altare è in scagliola. Malte di restauro sono rilevabili alla base delle murature all'interno, soprattutto sulle lesene che ripartiscono le pareti principali dall'abside e dal lato dell'ingresso. Anche la volta dell'aula è affrescata.

Il degrado appare evidente sulla volta dell'abside a causa di infiltrazioni recenti che hanno interessato anche gli stucchi. Sulle pareti dell'aula, si rileva un degrado alla base delle murature, che presenta un andamento variabile sino a circa m 1.2 dal piano di calpestio. I rinzi con malte di restauro, alla base di quasi tutte le pareti e lesene, lasciano supporre che esse fossero danneggiate approssimativamente nelle

zone dei rifacimenti. In alcune zone ai lati dell'ingresso si rileva un degrado recente, sino a circa 20 cm dal piano di calpestio.

2.1 Strategia delle indagini

Dalla ricognizione in situ, e dalla localizzazione del degrado, si è ipotizzato che le principali cause fossero legate a infiltrazioni in atto dalla copertura, umidità di risalita (si ricorda che l'edificio è su di un pendio, l'ingresso si trova sotto il livello della strada, le canalizzazioni di gronda e verticali presentano alcuni punti di degrado, non si notano pozzetti o sistemi di raccolta dell'acqua di displuvio) e condensazione.

Si è quindi provveduto al monitoraggio del microclima e all'ispezione termovisiva degli edifici e delle parti in stucco che sono contenute.

2.2 Risultati

Termografia

Le immagini all'infrarosso termico mostrano anomalie termiche indicative della presenza di infiltrazioni provenienti dal tetto, che interessano la volta dell'aula.

La ripresa è stata effettuata circa 40 giorni dopo la sistemazione del manto di copertura. Ciò nonostante si noti che alcune aree presentano un gradiente delle temperature molto graduale, mentre nel riquadro A la zona a temperatura inferiore presenta bordi marcati; nell'ipotesi che non ci siano differenze di materiale, si può concludere che le aree in cui le temperature diminuiscono gradualmente sono indicative di zone umide in fase di essiccamento, oppure di superfici ormai asciutte che però coprono strati ancora più umidi all'interno (si ricorda che le immagini sono state riprese mentre all'esterno si registrava una temperatura inferiore rispetto all'interno). In entrambi i casi la situazione è differente rispetto a quanto si rileva nel riquadro A, ove invece la zona più fredda indica che sono in atto flussi evaporativi di elevato tenore (fig. 1- 2).

Inoltre, la termografia degli spicchi sotto la volta, e della parte superiore della muratura, non ha messo in evidenza altre anomalie termiche significative della presenza di umidità. Si può concludere che le più recenti infiltrazioni dal tetto hanno imbibito solo lo specchio della volta, mentre i degradi degli stucchi sono imputabili a infiltrazioni di data più remota.



Fig. 1: Madonna del Restello, la volta affrescata

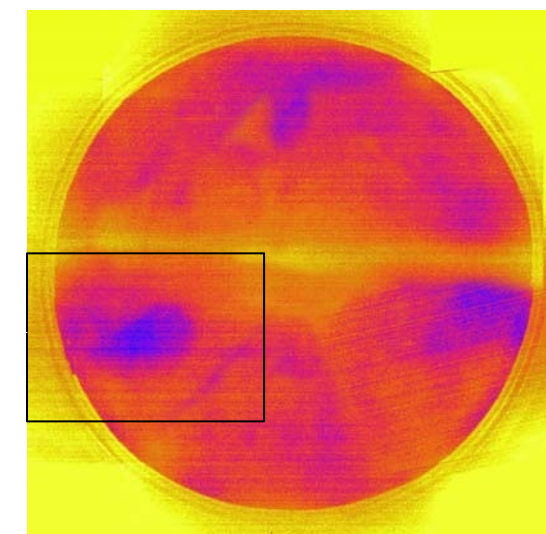


Fig. 2, ripresa termografica della volta, range delle temperature 11.8-14.8°C; condizioni ambientali: interno T°15.9°C - UR 68%; esterno T°11.5°C - UR 74.2%

Le indagini hanno inoltre messo in luce che esistono superfici più fredde alla base delle murature ai lati dell'ingresso, anche qui mostrando gradienti significativi di diverse situazioni. In fig. 3-4 si rileva la presenza di umidità che sta provocando il degrado delle finiture di recente posa. La zona più fredda, significativa del fronte di imbibizione, coincide con la zona più degradata della superficie. Invece l'ispezione termografica delle altre pareti mostra gradienti poco marcati, nonostante il degrado sia esteso, e potrebbe essere dovuto al fatto che la base della muratura, a contatto con il terreno, tende a mantenere temperature inferiori durante la giornata, quando flussi convettivi e l'irraggiamento diretto causano un incremento di temperatura nelle parti più elevate della muratura, e non sia invece indicativo di risalita capillare.



Fig.3, parete a destra della porta

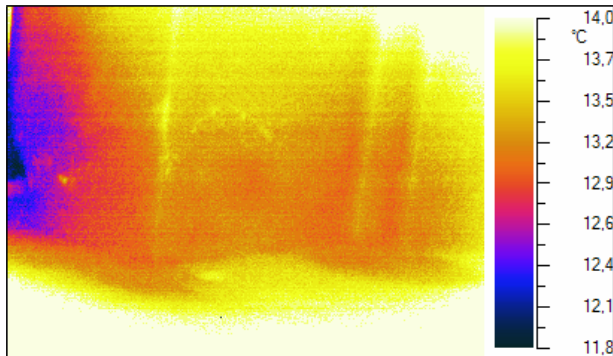


Fig. 4, Termografia all'infrarosso della parete a destra della porta, condizioni ambientali: interno T°15.9°C - UR 68%



Fig.5, statua di S. Luca, parete nord est
ambientali: T°15.9°C - UR 68%

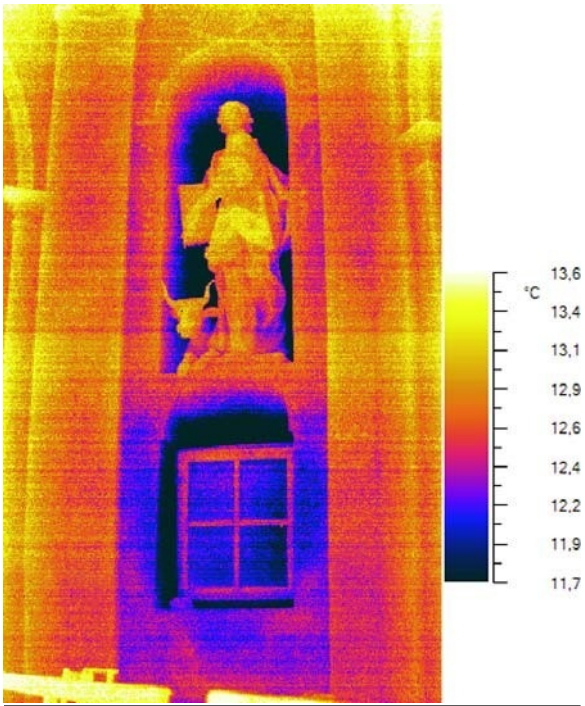


Fig.6 termografia della statua di S.Luca, condizioni



Fig. 7, statua di S. Marco, parete nord ovest
ambientali: T°15.9°C - UR 68%

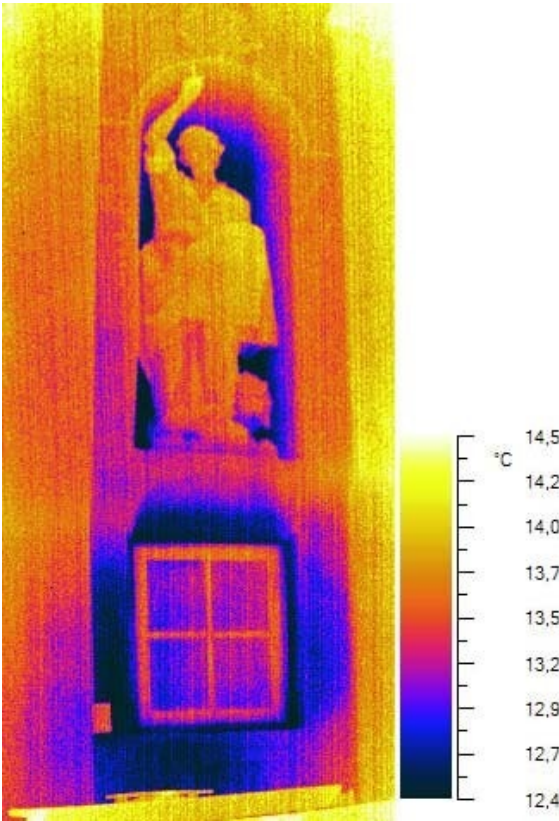


Fig. 8 termografia della statua di S. Marco, condizioni



Fig. 9, statua di S. Giovanni, parete sud ovest
Giovanni, condizioni
ambientali: T°15.9°C - UR 68%

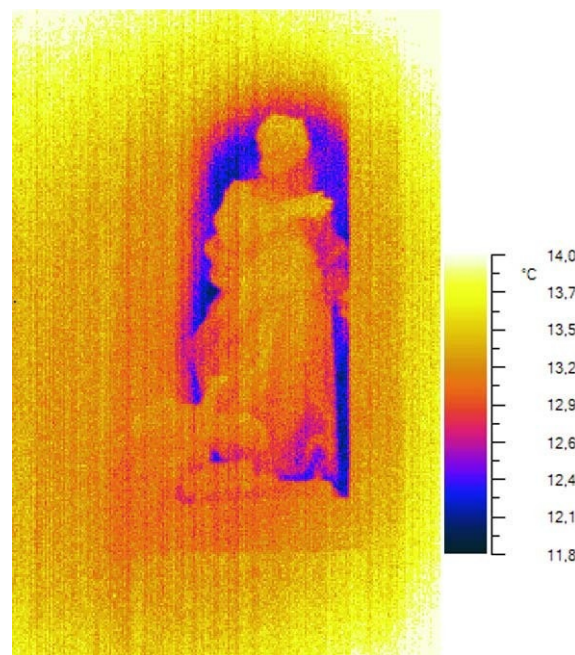


Fig. 10 termografia della statua di S.

In fig. 6, 8, 10 sono riportate le termografie all'infrarosso di tre delle quattro statue in stucco conservate nell'edificio. Le statue mostrano una sostanziale omogeneità della distribuzione delle temperature, nonostante siano allocate in nicchie che presentano anomalie termiche molto evidenti.

Le nicchie sono ricavate nello spessore della muratura, e pertanto hanno una temperatura superficiale inferiore rispetto alla struttura a tutto spessore. Inoltre, la statua di S. Luca è situata sopra una finestra, e l'immagine all'infrarosso termico mostra gli effetti del flusso di aria più fredda proveniente dall'esterno, causati dalla poca tenuta del serramento.

Analoga è la situazione della statua di S. Marco, che si trova in una posizione simmetrica rispetto a quella di S. Luca, anche sotto la nicchia di S. Marco si rileva una finestra, e la statua pertanto è interessata dalle stesse condizioni al contorno di quella di S. Luca.

Nonostante le temperature rilevate sulle statue siano omogenee in entrambi i casi, si rileva circa 1°C di differenza del range di temperature nelle due inquadrature, probabilmente dovuto all'orientazione delle pareti (la nicchia della statua di S. Luca è a nord ovest, quella della statua S. Marco è a nord est), ed al fatto che le pareti sud ed est erano irraggiate direttamente al momento delle riprese.

La situazione della muratura in corrispondenza della statua di S. Giovanni invece presenta sbilanci termici meno evidenti, pur restando rilevabile il gradiente a causa del minor spessore della struttura. Tuttavia, le temperature medie della superficie della statua sono molto simili a quelle registrate sulla statua di S. Luca.

Le temperature che si registrano sulla statua di S. Matteo sono simili a quelle delle altre statue, ma la muratura della nicchia che lo ospita presenta ponti termici meno estesi poiché su quel lato è addossata la sacrestia.

Se ne conclude che i materiali costituenti la superficie degli stucchi mantengono una condizione di equilibrio con la temperatura dell'ambiente e non subiscono effetti dovuti alla vicinanza a superfici più fredde. Il comportamento termico delle statue indica che la struttura (realizzata in cartapesta, probabilmente per esigenze di leggerezza anche d'ordine strutturale), ha una bassa inerzia termica. Tale condizione è da considerare favorevole alla conservazione, poiché le statue non risentono degli sbilanci

termici delle pareti in cui sono alloggiate, e di eventuali cambiamenti indotti dall'ambiente esterno, come ad esempio l'irraggiamento diretto delle murature in funzione dell'orientazione.

Monitoraggio microclimatico

Il controllo delle variabili ambientali mette in evidenza che nonostante le infiltrazioni attive, le condizioni ambientali si mantengono molto favorevoli alla conservazione delle superfici (valori inferiori al 60%), se si escludono alcune giornate in cui l'UR raggiunge tassi elevati (tra il 70 e l'80%).

Confrontando i valori registrati all'esterno, in località vicina, si riscontra che in queste giornate anche all'esterno si misurano picchi di UR, in concomitanza di precipitazioni atmosferiche o di intensa nuvolosità. Si sottolinea che per diminuzioni di UR esterna si osservano una concomitante diminuzione dell'UR interna in tempi molto rapidi (anche meno di un'ora). Al contrario però non è altrettanto veloce l'incremento di umidità all'interno anche in periodi prolungati di pioggia. Ottobre 2005 e 2006 sono stati i mesi con valori più elevati in periodi prolungati, rispetto a tutto l'anno di monitoraggio.

La temperatura all'interno si mantiene tra i 24°C e i -1°C (tra fine novembre e fine febbraio le oscillazioni sono tra -1 e +3.5°C, con conseguente pericolo di crioclastismo per le superfici più umide).

Le indagini sono state estese, per finalità di confronto, a un edificio non lontano con alcune caratteristiche morfologiche, tecnologiche e dimensionali affini: la cappella XII, o dell'Ascensione, del Santuario della B.V. del Soccorso di Ossuccio, che contiene finiture ad affresco e statue in terracotta con inserti in stucco eseguite dal famoso plastificatore ticinese Agostino Silva, che qui propone lo stesso schema figurativo utilizzato per la composizione di analogo soggetto nel Duomo di Como. Qui la situazione, che richiede un monitoraggio prolungato rispetto a quello finora svolto, presenta una UR tendenzialmente elevata che non tende a diminuire altrettanto rapidamente, ma che non sembra aver determinato danni paragonabili a quelli attribuibili alle infiltrazioni dalla copertura.

3 S. Lorenzo a Laino

L'edificio, suddiviso in tre navate, sorge su di un ripiano del pendio a nord di Laino. All'interno vi è un'imponente apparato decorativo in stucco che decora le volte e le cappelle. La muratura si presenta intonacata esternamente con malta cementizia, affrescata e con tinte a calce all'interno. La pavimentazione esterna è in beole legate con malta cementizia. L'analisi a vista dei materiali in opera e della distribuzione del degrado hanno portato a formulare l'ipotesi della presenza di umidità di risalita, in particolare sul lato settentrionale.

3.1 Strategia delle indagini

La finalità degli accertamenti diagnostici è quella di misurare il regime termoigrometrico delle murature. Le indagini hanno avuto la finalità di localizzare le zone in cui il contenuto d'acqua è più rilevante al fine di identificare le cause e le vie di adduzione. La prima battuta delle indagini è stata eseguita dopo alcune settimane di piogge intense, anche se discontinue. La seconda battuta è stata effettuata nelle prime settimane di un autunno caldo e asciutto. La differenza di contenuto d'acqua rilevato ha permesso di verificare la portata delle cause ipotizzate. Si è provveduto a ispezionare le superfici dell'edificio, interno ed esterno, mediante termografia all'infrarosso, per localizzare le anomalie termiche che potessero essere indicative della presenza di umidità in superficie. Su alcuni punti di queste, si è verificato il contenuto d'acqua con test gravimetrici, sia ricavati in superficie sia a diverse profondità, al fine di ottenere i valori di imbibizione lungo la sezione trasversale della muratura.

3.2 Risultati

Le indagini termoisometriche, svolte durante il periodo estivo, mentre l'impianto di riscaldamento era spento, identificano un'anomala distribuzione di umidità sia in superficie che in profondità nelle murature indagate. La presenza di acqua non segue un andamento regolare, come ci si aspetterebbe in presenza di umidità di risalita dovuta ad una causa di portata costante. In corrispondenza dei punti in cui i prelievi sono risultati a maggiore contenuto d'acqua, sul lato nord, verso valle, si rileva la presenza di un pluviale e di un pozzetto. All'interno, la distribuzione delle temperature superficiali segue un gradiente crescente con la quota. La fascia che rimane più fredda ha altezza variabile, non supera i 20-30 cm dal piano di calpestio. Il gradiente è di circa 1-2°C (fig. 12). Su queste superfici si possono verificare precoci fenomeni di condensazione. Nei punti in corrispondenza dei picchi di contenuto d'acqua rilevati all'esterno, anche all'interno si rileva un gradiente termico indicativo della presenza di umidità (fig. 14). I risultati del monitoraggio del microclima mettono in luce che tuttavia non si verificano frequentemente condizioni di elevata UR: i tassi più elevati si sono registrati nel mese di maggio (dal 15 al 24 si raggiungono valori fino dal 75 all'83%), in concomitanza di prolungate precipitazioni atmosferiche. In questi casi l'aria più umida penetra nell'edificio e rimane più a lungo nelle zone in cui si hanno minori scambi con l'esterno (l'altare). Le differenze di UR sono intorno al 5-10%.



Fig. 11, immagine della cappella di sinistra, parete ovest della seconda cappella settentrionale. Range delle temperature: 16.5-18.4°C; condizioni ambientali: T°C 20.5, UR 58.6%



Fig. 13, parete destra della terza cappella, lato nord della terza cappella del lato settentrionale. Range delle temperature: 15.8°-18.9°C, condizioni ambientali: T°C 20.5, UR 58.6%

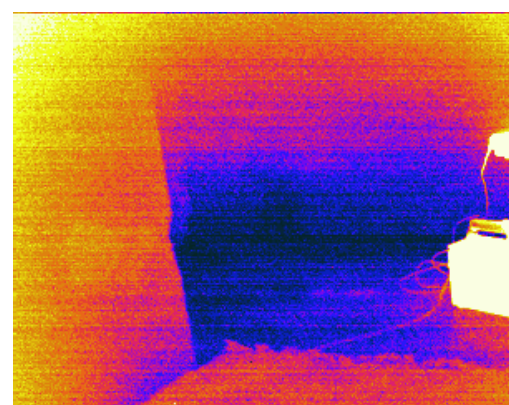


Fig. 12, termografia della parete destra

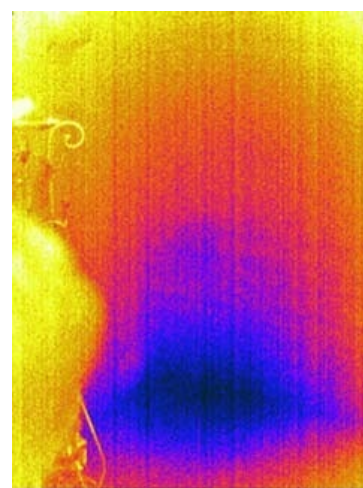


Fig. 14 termografia della parete destra della terza

4 Discussione dei risultati e conclusioni

Nei casi studiati, i degradi degli apparati in stucco sono risultati principalmente imputabili alle infiltrazioni dalla copertura.

Il microclima, e soprattutto le sue variazioni, che potrebbe essere responsabili dei processi di condensazione, che avvengono prioritariamente sulle superfici con caratteristiche termiche che ne determinino una minore temperatura superficiale, non sembra influire in modo preponderante sulle condizioni di conservazione degli stucchi, in buon accordo con quanto già pubblicato riguardo a una delle poche indagini sugli stucchi attente alla componente ambientale [1], in cui i contenuti di umidità riscontrati negli stucchi risultarono inferiori ai valori fisiologici. Tuttavia, nel caso di degrado del materiale, con formazione di neocomposti che tendono a interagire con l'umidità ambientale in modo più rapido, non si esclude un'azione peggiorativa dovuta alle condizioni ambientali sfavorevoli.

Nelle condizioni climatiche rilevate, diventa un punto cruciale l'apporto determinato dalla ventilazione. Una ventilazione anche limitata (che non determina veloci ricambi di aria e moti convettivi) contribuisce a ridurre il permanere di condizioni di rischio dovute all'elevata UR.; a favore della conservazione è il moto lento, ma continuo, delle masse d'aria all'interno dell'edificio e lo scambio con l'esterno. Un ulteriore vantaggio si ottiene quando si è in grado di regolare l'afflusso di aria umida dall'esterno. Infatti, i dati ambientali della zona indicano che la variabilità di UR e T° esterne è molto alta, la permanenza di tali condizioni supera raramente le 48 ore. I movimenti di masse d'aria e le repentine variazioni di pressione atmosferica generano una variabilità delle condizioni climatiche che può giocare a favore del controllo microclimatico, nel momento in cui sia possibile ottenere una manutenzione costante dell'edificio. E' questo il caso di edifici tuttora in uso, in cui la fruizione si accompagna al controllo sistematico, comprensivo di operazioni di minimo costo ma di grande efficacia se coordinate ed ordinate all'interno di un programma di conservazione.

Grazie al presente programma di ricerca è stata implementata una ricerca applicativa sulle aree a rischio di degrado in condizioni climatiche di elevata umidità ambientale e brusche diminuzioni di temperatura, rivolta specificamente allo studio dei differenti comportamenti dei materiali rispetto all'interazione con l'ambiente in funzione delle loro finiture superficiali. Tale aspetto, peraltro, può essere predominante quando siano presenti superfici di pregio sottoposte a integrazioni con malte di restauro.

Le tecniche di indagine e le procedure utilizzate sono state selezionate in conformità alle applicazioni già consolidate nell'ambito delle prove preliminari sul patrimonio del costruito storico diffuso [2-6].

I primi esiti della ricerca hanno permesso di correlare le differenze di temperatura rilevate al grado di levigatezza delle superfici, avendo verificato che composizione e porosità erano molto simili. Le prove in laboratorio hanno messo in luce che tra i materiali utilizzati per le malte di restauro, le più significative differenze di assorbimento di calore si rilevano negli impasti additivati con carbonato di calcio, che hanno avuto una stesura finale con utensili differenti (spatola, cazzuola o simili e spugna). Anche la diffusione dell'acqua, in superficie, viene influenzata dalla scabrosità della superficie; le prove al microscopio hanno permesso di correlare il grado di esposizione delle parti di inerte dalla superficie alle caratteristiche di assorbanza e riflettanza. Una ricerca messa a punto presso la SUPSI [7], ha permesso di esplorare la correlazione tra porosità, permeabilità al vapore e finiture superficiali, giungendo ad escludere, (peraltro per malte non addittivate con carbonato di calcio), una particolare influenza delle finiture sull'assorbimento di acqua allo stato di vapore. I risultati sulla permeabilità al vapore sembrano pertanto in buon accordo con quelli ottenuti sull'assorbimento di calore: infatti le malte che non presentano gradienti termici differenti in funzione della finitura non presentano neppure differenze di assorbimento di vapore chiaramente correlabili al tipo di finitura.

La grande variabilità di composizione e finitura rilevata nei pur pochi casi studio considerati nel programma di ricerca, e l'impossibilità di prelevare campioni di adeguata consistenza, hanno però

indotto a considerare con molta prudenza la rappresentatività dei campioni finora realizzati e utilizzati per le simulazioni in camera climatica. La attività sperimentale verrà proseguita nell'ambito di altre attività di ricerca, estendendola peraltro ad un più largo campo di materiali lapidei artificiali.

Bibliografia

- [1] Carmen Natali, Giuseppe Lorenzini, *Degradi e metodi di conservazione dello stucco, analisi e progetti per l'Oratorio Imbonati di Cavallasca*, in "Arkos", n 1, 2000, ed. UTET Torino
- [2] S. Della Torre, E. Rosina, M. Catalano, C. Faliva, G. Suardi, A. Sansonetti, L. Toniolo, *Early Detection And Monitoring Procedures By Means Of Multispectral Image Analysis*, Art 2005, Lecce 2005
- [3] S. Della Torre, E. Rosina, V. Pracchi, G. Suardi, N. Ludwig, V. Redaelli, A. Sansonetti, R. Negrotti, *Le indagini multispettrali per il riconoscimento telemetrico degli interventi di restauro nelle pitture murali*, in atti del XXI Convegno Internazionale, Bressanone 2005
- [4] N. Ludwig, E. Rosina, *Restoration mortars at IRT: optical and hygroscopic properties of surfaces*, QIRT 2006, Padova 2006
- [5] S.Della Torre, E. Rosina, C. Faliva, M.Catalano, *Sperimentazione di tecniche analitiche integrate per la diagnostica finalizzata alla conservazione preventiva*, in atti del IV Congresso Nazionale IGIIC – Lo Stato dell'Arte – Siena, 2006
- [6] E. Rosina, N. Ludwig, *Le malte di restauro in condizioni ambientali severe: mappatura delle zone a rischio*, memoria presentata al convegno *Le superfici lapidee artificiali in architettura, Metodiche di conservazione e valorizzazione di intonaci e laterizi*, Politecnico di Milano, 14 febbraio 2006
- [7] A. Jornet, A. Somaini, A. Romer, *Lime mortar for renders is there a relationship between finishing technique and properties? Preliminary results*, International Workshop repair mortars for historic masonry, Delft University of technology, January 2005, Delft (Netherlands).

11. Restauri a rischio: microclima e differenze superficiali dei materiali in opera

E. Rosina (1), S. Della Torre (1), S. D'Ascola (1), S. Caglio (2)

(1) Politecnico di Milano, Dipartimento BEST (2) Università degli Studi di Milano, IFGA

Sommario

Le analitiche dell'immagine hanno dimostrato un grande potenziale nell'individuazione e trasmissione delle informazioni delle indagini diagnostiche applicate agli edifici storici. La ricerca che si presenta mira ad implementare la loro applicazione nei passaggi caratteristici e critici del processo di conservazione dei beni. Tra le tecniche utilizzate, la termografia all'infrarosso (IRT) compendia utilmente la preliminare ispezione nel range del visibile (l'analisi a vista e con microscopio da cantiere). Diversi studi sono stati condotti sulla mappatura delle zone soggette a umidità mediante IRT, ma ancora non si è considerato l'influenza della differente levigatezza di alcune superfici rispetto alle circostanti nella distribuzione delle temperature superficiali. La ricerca muove dal presupposto che, in condizioni climatiche di elevata umidità ambientale e brusche diminuzioni di temperatura, il rischio di condensazione è maggiore proprio nelle aree che già presentano un gradiente termico negativo rispetto a quelle circostanti, sia per differenti strutture sottostanti i rivestimenti, sia per la differenza nelle tecniche di stesura delle malte impiegate. Occorre infatti considerare che negli interventi in cui si sia proceduto ad un'integrazione, la variazione di levigatezza dei materiali che vengono a trovarsi in opera può causare un adsorbimento differenziale dell'umidità ambientale, e quindi un degrado maggiormente evidente ed avanzato attorno alle zone più compatte e levigate. L'integrazione di IRT, analisi microscopiche dei materiali di finitura, controllo microclimatico, permetterebbe di fornire una adeguata compilazione del Consuntivo scientifico previsto per i lavori concernenti i beni culturali dall'art. 221 del Regolamento dei Lavori pubblici 554/99, ma anche di stabilire i valori soglia per la buona conservazione dei materiali in opera, cioè di produrre un contenuto essenziale di qualsiasi piano di manutenzione. Alcuni casi di studio in area Lombarda illustrano i risultati raggiunti.

- (1) Dipartimento BEST, Politecnico di Milano, V. Ponzio 31, 20133 Milano, elisabetta.rosina@polimi.it, stefano.dellatorre@polimi.it, simona.dascola@polimi.it
 (2) Istituto Fisica Generale Applicata, Università degli Studi di Milano, V. Celoria 16, 20133 Milano, simone.caglio@email.it

Introduzione

Le condizioni climatiche critiche sono già state oggetto di segnalazioni come frequenti cause di degrado negli edifici storici. La mancanza di ventilazione e di riscaldamento adeguati, o l'uso improprio degli impianti, quando presenti, è spesso causa principale di degrado delle superfici interne, con effetti particolarmente vistosi sulle decorazioni. La precoce individuazione di elementi ed aree a rischio, e l'individuazione sicura dei fattori che hanno generato il degrado (o che lo possono provocare nel futuro, se non si verificano modifiche dello status quo), consente agli operatori di programmare le operazioni per la

manutenzione preventiva. Le esperienze già consolidate nel campo della manutenzione programmata, hanno permesso di evincere che il controllo nel tempo dei punti critici permette l'intervento tempestivo e mirato, conseguendo un cospicuo risparmio economico e soprattutto garantendo l'effettiva conservazione dell'oggetto. Dalle esperienze già presentate [1-3], è emerso che la ricognizione periodica con tecniche di analisi multispettrale consente di individuare e controllare l'evolversi di incipienti fenomeni di degrado dovuti a non omogeneità della struttura. La ricerca attuale è finalizzata a identificare e ottimizzare le tecniche di ripresa nella banda spettrale del visibile e dell'infrarosso termico per la localizzazione delle anomalie superficiali e subsuperficiali che generano processi di degrado in condizioni microclimatiche critiche. La selezione delle tecniche che rispondono ai requisiti del monitoraggio per la conservazione programmata è stata già discussa in altra sede [4], a cui si rimanda per i criteri adottati. In questo contributo si propone l'uso di tecniche di analisi dell'immagine per la valutazione delle zone con diversa "texture", spesso corrispondenti alle malte di restauro, in particolare delle zone attorno alle stuccature che sono risultate più soggette a condensazione e quindi a possibile degrado [5].

Casi di studio

S.ta Maria presso S. Paolo, Cantù: malte di restauro e microclima

L'edificio, costruito nel 15° secolo, è costituito da una piccola aula absidata, l'interno è completamente affrescato. A causa del prolungato abbandono, è stato oggetto di un esteso restauro delle superfici decorate negli anni '50, che ha comportato l'integrazione di malte di restauro. La mancanza di manutenzione ha arrecato nuovo degrado delle preziose superfici, che ha reso indispensabile il nuovo restauro che si è recentemente concluso. L'intervento ha previsto le indagini per accertare le condizioni degli affreschi e determinare le condizioni per la miglior conservazione. Le ripetute battute termografiche, psicrometriche, e gravimetriche, tra gli anni 1998 e 2004, hanno permesso di definire una strategia di diagnosi che comporti il minor numero di misure necessarie alla definizione delle vie di adduzione d'acqua, delle zone maggiormente a rischio e delle aree ove si

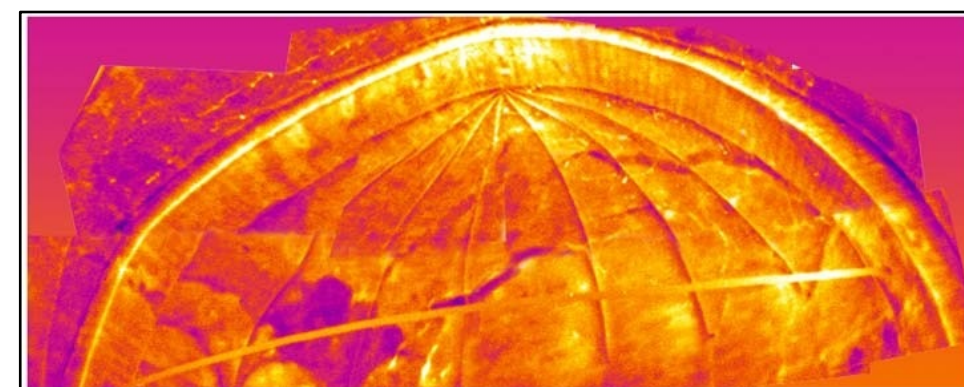


Fig 1. S. Maria a Cantù, mosaico dei termogrammi della volta absidale. ΔT : 8,7-12,1 °C

ottengono dati maggiormente significativi del regime termoigrometrico delle murature [6]. Durante le riprese termografiche in regime transitorio, (fig. 1) è stato possibile localizzare le malte di restauro della volta, si mostrano con chiara evidenza all'infrarosso termico. La



verifica a ponteggio montato, nel 2004, ha permesso di confermare la mappatura eseguita precedentemente, da terra (fig. 2). Le analisi porosimetriche svolte durante l'ultima battuta, nel 2004, hanno consentito di evincere che le malte di restauro e quello originali hanno porosità (e quindi densità) molto simili [7]. Ciò nonostante, la ripresa all'infrarosso termico mostra un gradiente termico più elevato laddove la superficie si presenta meno levigata, e quindi su molte delle integrazioni.

Fig 2. S. Maria a Cantù, particolare della volta absidale, si notino le integrazioni con malte di restauro

S.ta Maria in Strada, Monza: malte di restauro e infiltrazioni

L'edificio sorto nella seconda metà del 14° secolo ha avuto un rifacimento completo all'interno nel 17° secolo. A causa del crollo di una porzione degli intonaci della volta absidale, si è proceduto agli accertamenti diagnostici per verificare l'estensione delle infiltrazioni che hanno causato il distacco del rivestimento e l'eventuale presenza di altre zone già degradate. Le riprese sono avvenute in regime transitorio: in fase di primo riscaldamento, sono risultate evidenti estese integrazioni con malte diverse (fig. 3-4). Le decorazioni e la coloritura non permettono di distinguere alcuna discontinuità nel visibile.

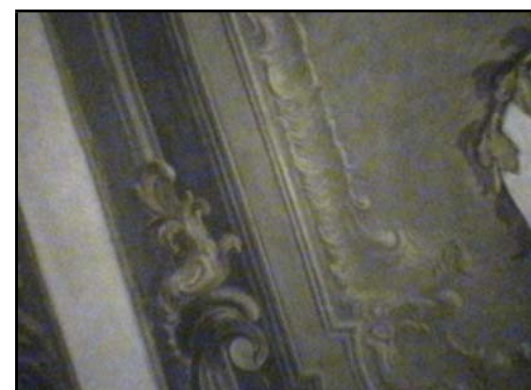
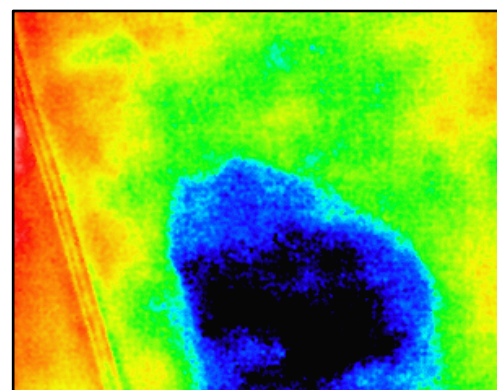


Fig 3. S. Maria in Strada, termogramma dell'integrazione dovuta ad un precedente restauro dell'intonaco. ΔT : 27-30°C Fig 4. S. Maria in Strada a Monza, immagine nel visibile della porzione di intonaco inquadrata in fig. 3

L'oratorio dei Santi Caterina e Ambrogio a Solaro: malte di restauro, stuccature e microclima

L'edificio, sorto nella seconda metà del 14° secolo è a pianta longitudinale costituito da un'aula e dal presbiterio rettangolari e voltati. Al suo interno è conservato un importante ciclo pittorico di stile gotico lombardo, di cui sono andate perse ampie zone alla base delle murature. Dall'analisi a vista, il degrado dei materiali si manifesta in modo più esteso e vistoso all'interno dell'edificio e i maggiori danni sono imputabili ad umidità di risalita e a condensazione. Il pessimo stato di conservazione dei dipinti murali, è dovuto alla precarietà degli intonaci che risultano in più parti sollevati dal supporto murario, con spancamenti, lacune di neoformazione, e parti pericolanti e ai

sollevamenti della pellicola pittorica. Distribuite su tutti gli affreschi, sono state rilevate stuccature la cui dannosità è comprovata dalla presenza di fenomeni di disgregazione e sollevamento corticale sull'area immediatamente circostante. Il fattore di deterioramento è stato individuato

proprio nelle caratteristiche materiche e morfologiche delle stuccature, sulle quali si osserva di frequente condensazione dell'UR ambientale. Si è chiarito che la stesura della stuccatura con lisciatura finale ha dato luogo ad una materia eccessivamente compatta che è risultata scarsamente permeabile comportando, in presenza di condizioni termoigrometriche sfavorevoli, quali quelle che si generano nell'edificio da ottobre ad aprile¹, lo spostamento sull'area dipinta circostante dei meccanismi di traspirazione delle superfici, ingenerando la disgregazione dello strato pittorico e dell'intonachino (fig. 5). Anche in questo caso si è effettuato un monitoraggio microclimatico e del regime termoigrometrico della muratura, a cui si è aggiunto una serie di prove sperimentali per l'individuazione delle integrazioni di intonaco e delle stuccature già in opera [5]. A questo fine, sono state effettuate tre battute in campo. Nella prima battuta attiva, sono state facilmente riconosciuti gli interventi di integrazione della volta (fig. 6, 7, 8). Il riscaldamento per convezione ha provocato un aumento della temperatura ambientale di 8°C in 40 minuti.

Il monitoraggio microclimatico ha messo in luce che dall'autunno alla primavera l'UR non raggiunge mai valori inferiori al 75%, mentre sono numerosi i giorni in cui supera il 90%. Nell'anno in cui è stato effettuato il monitoraggio si è provveduto a riscaldare l'interno dell'edificio con un impianto provvisorio, che ha comunque garantito una temperatura minima di 6-8°C, anche nelle giornate più fredde. Nonostante sia stato rilevato che le variazioni climatiche esterne influenzano molto lentamente il microclima, le brusche diminuzioni di temperatura rimangono comunque il maggior fattore di rischio per la conservazione degli affreschi.



Fig 5. Oratorio dei S. Caterina e Ambrogio, affreschi dell'abside, particolare delle stuccature dovute a precedenti restauri



Fig 6. Oratorio dei S. Caterina e Ambrogio a Solaro, affreschi della volta della navata

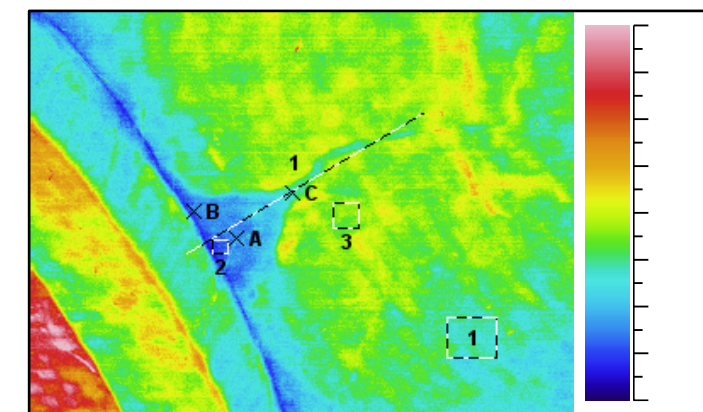


Fig 7. termogramma della volta, la malta di integrazione risulta più evidente all'infrarosso rispetto al visibile

Nella seconda battuta le modalità di riscaldamento sono state studiate in funzione della modellazione basata sulle misure in laboratorio [8]. Pertanto si è ottenuto una lama di calore che lambisse la superficie nella fascia di maggior interesse (sopra il rinzafo in malta cementizia) e che fosse così omogenea da non mettere in risalto le difformità dovute a colore o degrado, ma solo gli interventi di restauro della superficie affrescata. Il risultato ottenuto ha permesso di evidenziare le stuccature e i risarcimenti; in particolare in fig. 10 si noti la linea di giunzione tra l'affresco quattrocentesco (area A) e il restauro ottocentesco (area B) riconoscibile, come area critica (in basso), per l'elevato degrado. Una linea permette di delimitare le aree di intervento sull'affresco. La stuccatura al bordo superiore della zona ottocentesca si presenta più fredda all'infrarosso termico, esattamente come gli interventi di minore estensione e che a vista appaiono come risarcimenti con malte di restauro. Le analisi chimiche e mineralogiche condotte sui campioni prelevati dalla stuccatura e dagli affreschi hanno permesso di appurare che si tratta di calcite, con l'aggiunta di polvere prevalentemente silicea. La porosità è molto simile in tutti i campioni. Pertanto si tratta di materiali che hanno consistenza e caratteristiche molto vicine. Escludendo quindi differenze dovute al materiale ed alla cromia, i risultati termografici non potevano che essere giustificati che dalla differenza delle proprietà ottiche superficiali. Infatti, la seconda fase di sperimentazione in laboratorio, su provini opportunamente preparati con materiali simili a quelli indagati in campo, ha permesso di ottenere risultati sostanzialmente diversi sulle superfici che sono state trattate con diverse tecniche di applicazione.

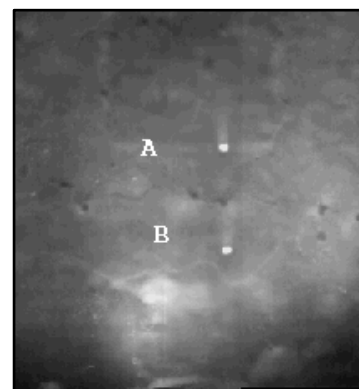


Fig 9. Oratorio dei S. Caterina e Ambrogio, affresco con integrazioni di restauro e stuccature Fig 10. Oratorio dei S. Caterina e Ambrogio, mosaico dei termogrammi dopo il riscaldamento

Prove di laboratorio

I test in laboratorio sono stati finalizzati all'identificazione dei fattori che determinano le diverse curve di assorbimento che sono state registrate nei casi di studio, laddove le malte di restauro sono rese evidenti all'infrarosso termico, in regime transitorio. Inoltre, la fase di sperimentazione è stata indirizzata a determinare le migliori condizioni di misura e le procedure al fine di verificare l'ipotesi che le differenze di temperatura rilevate fossero dovute alle differenze di levigatezza (scabrosità) delle superfici, dovuta ai vari utensili usati nella fase di finitura sono state preparate 12 malte variando i componenti e variando le proporzioni tra legante e aggregato. Le malte sono state applicate



Fig 8. Analisi della temperatura lungo un profilo e in alcuni punti

per uno spessore medio di 2-3 mm su 24 mattoni pieni, utilizzando 4 utensili per le finiture. Ogni malta è stata applicata su due mattoni, precedentemente puliti e bagnati, avendo cura di completare la stesura su ogni metà mattone con fratazzo di legno, cazzuola, spugna e spatola. I materiali e gli utensili usati sono stati scelti tra i più comuni per la confezione e applicazione di malte di restauro sul costruito antico, quali grassello di calce, carbonato di calcio, sabbia e polvere di marmo.

I provini sono stati sottoposti a riscaldamento mediante 2 lampade alogene da 500 W, disposte su supporti regolabili a 45° rispetto alla superficie oggetto dell'indagine (fig. 11). Si è interposto del materiale isolante tra i provini per limitare la diffusione laterale del calore. I campioni di cui si presentano i risultati sono stati quelli realizzati con malte di calce, sabbia e polvere di marmo 1:3, calce sabbia e polvere di marmo 1:2, calce sabbia e carbonato di calcio 1:2.

Modalità delle prove

Per ottenere la curva di riscaldamento delle superfici intonacate, si è proceduto all'acquisizione dinamica di alcune sequenze termografiche con una frequenza di acquisizione compresa tra 10 secondi e 1 minuto, per 45 minuti di riscaldamento. Il gradiente termico complessivo ottenuto per ogni sequenza è di 5°C. Per verificare il coefficiente di emissività, probabile causa della diversa risposta termica delle 4 differenti finiture, sono stati applicati alle superfici alcuni target ad emissività nota. A seguito delle prove termografiche, si è proceduto all'analisi con microscopio da cantiere, con lenti a 50 e 100 ingrandimenti. Sono state scattate 4 immagini per ogni parte omogenea di provino, in modo da poter escludere eventuali difetti della superficie.

Risultati

Le sequenze riprese durante la fase di riscaldamento sono state processate, ottenendo la curva di riscaldamento per piccole aree e punti di ognuna delle zone finite con gli utensili scelti. L'immagine 12 mostra la termografia dei provini al termine del riscaldamento e in fig. 13 sono riportate 4 curve di incremento di temperatura sulle aree risultate più interessanti. Non tutti i provini presentano un gradiente termico tra le parti trattate con attrezzi diversi; la differenza di temperatura più elevata si registra sui campioni di malta costituita da grassello di calce, carbonato di calcio e sabbia 1:2. Le quattro curve di riscaldamento sulle 4 aree selezionate (stesura a fratazzo, spugna, cazzuola e spatola) hanno andamenti simili e sono raggruppabili in due gruppi: fratazzo/spatola, spugna/cazzuola. Le curve di riscaldamento presentano trend del tutto comparabili seppur con un gradiente termico totale maggiore per il secondo gruppo: ciò è determinato

Descrizione del set up sperimentale



Fig 11. Set up sperimentale in laboratorio, sono inquadrati i 6 campioni di malte

principalmente dalla maggiore crescita della curva nei primi istanti di riscaldamento (3-4 minuti), ed è imputabile ad un maggiore assorbimento di queste zone della radiazione infrarossa. In particolare la zona che presenta una temperatura più elevata corrisponde alla parte su cui è stata utilizzata la spugna. In quest'area si ottiene un incremento di temperatura superiore (di circa 1°C) alla temperatura media dell'altra parte del provino, che è stata rifinita con spatola. Analogo è l'andamento dei risultati ottenuti nella zona rifinita con cazzuola. Associando le immagini riprese al videomicroscopio alle considerazioni appena esposte, è possibile ottenere conferma dell'ipotesi di lavoro. La fig. 14 mostra la superficie del provino nella zona con stesura a spugna. L'area si presenta molto irregolare, con cavità e protuberanze dovute all'inclusione dell'inerte, che rimane però esposto per buona parte della superficie esterna. Il materiale è scabro, e la vistosa presenza dell'inerte altera le caratteristiche ottiche e termiche della superficie. Infatti, le prove per la misura dell'emissività hanno dato risultati diversi sulla zona "spugnata", rispetto alle aree più levigate. Per i corpi opachi vale che l'emissività spettrale è uguale all'assorbanza pertanto è lecito dedurre che i campioni a finitura scabra, che presentano l'inerte "a vista" nelle immagini al microscopio (spugna e cazzuola), e che hanno emissività maggiore dei corrispettivi più levigati, con inerte ricoperto dal carbonato di calcio, assorbano maggiormente la radiazione infrarossa con conseguente maggiore riscaldamento. Sono state eseguite misure in riflettanza spettrale nel visibile e vicino infrarosso che hanno confermato come la finitura a spugna, avendo uno spettro di riflettanza più basso rispetto alle altre zone, abbia una maggiore capacità assorbente. Per confronto, in fig. 15 è inquadrata la superficie della parte che è stata finita con spatola: il materiale si presenta molto levigato, senza protuberanze, l'inerte è annegato nel legante, e ne rimane a vista una piccola porzione, su cui comunque è osservabile un velo di calce. La fig. 16 illustra l'ingrandimento dell'area "fratazzata", molto simile a quella esaminata in fig. 15, con l'unica differenza che l'inerte si presenta in maggior rilievo. Anche in questo caso si nota un velo di calce a rivestire i granuli dell'inerte nella parte più esposta. La fig. 17 riprende la zona trattata con cazzuola, che presenta una distribuzione dell'inerte simile a quanto osservato per la parte "spugnata"; in aggiunta si notano tracce di calce anche sulla superficie esterna dei granuli di inerte.

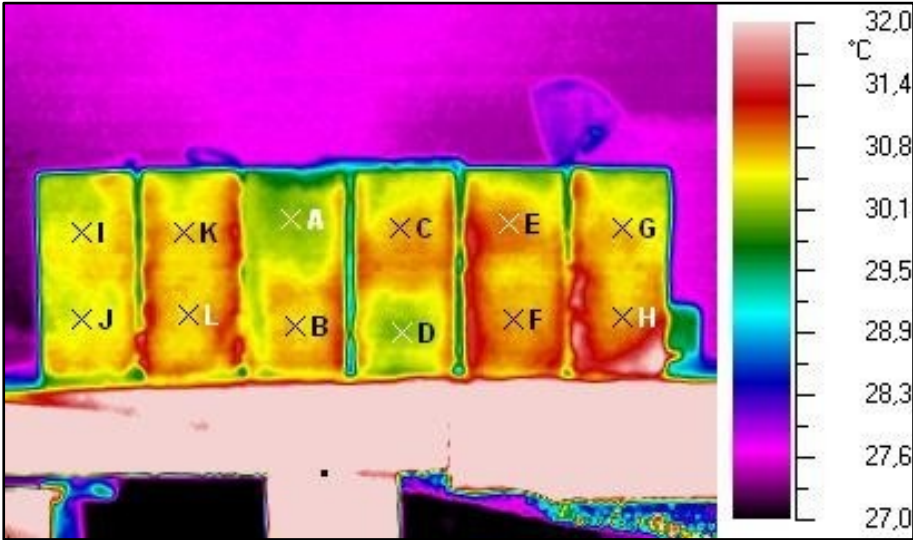


Fig 12. Termografia dei provini alla fine del riscaldamento, sono indicate i punti in cui si è ottenuta al curva di riscaldamento

Sostanzialmente, il confronto tra il comportamento termico e la distribuzione dei componenti della malta permette di apprezzare quanto le caratteristiche termiche siano determinate dalle tecniche di finitura del materiale.

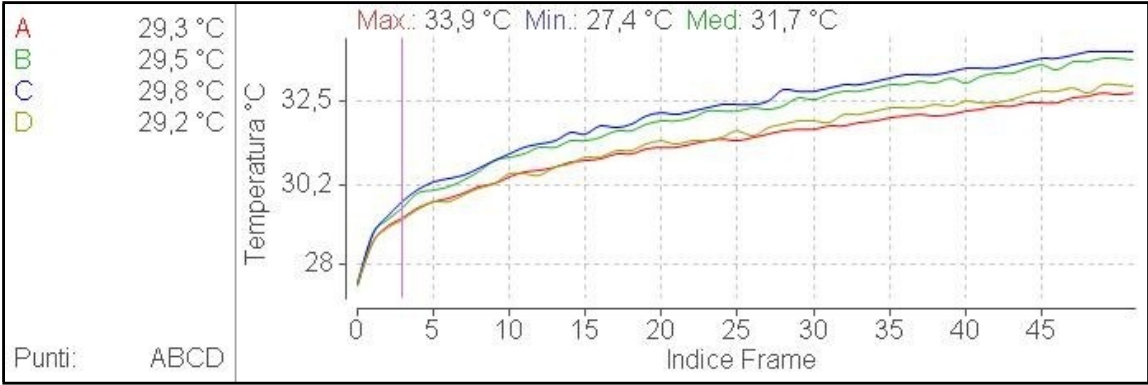


Fig 13. Curve di riscaldamento delle malte di carbonato di calcio e calce, stese a fratazzo, spatola, spugna e cazzuola

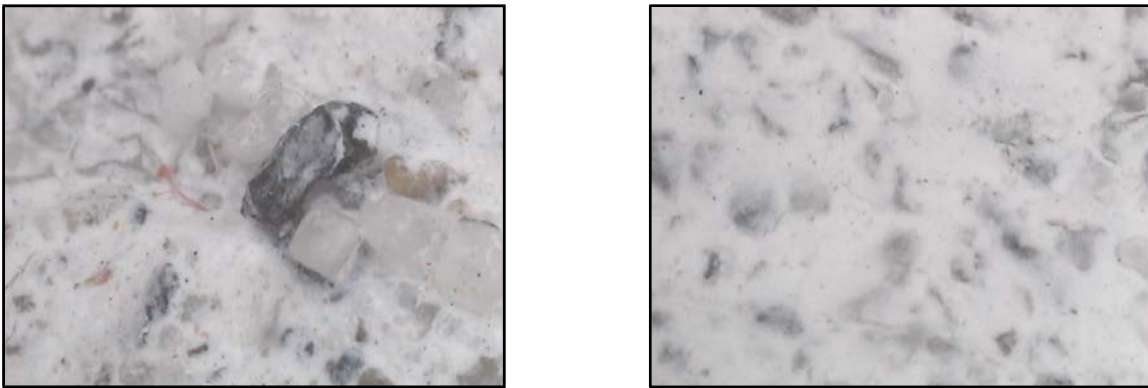


Fig 14. Immagine al microscopio, 100 x, campione di malta di calce e carbonato di calcio steso a spugna
Fig 15. Immagine al microscopio, 100 x, campione di malta di calce e carbonato di calcio steso a spatola



Fig 16. Immagine al microscopio, 100 x, campione di malta di calce e carbonato di calcio steso a fratazzo
Fig 17. Immagine al microscopio, 100 x, campione di malta di calce e carbonato di calcio steso a cazzuola

Conclusioni

Le indagini termografiche hanno consentito di delimitare le aree di intervento e di ripresa degli strati pittorici dovuti a manutenzioni, con metodi complementari all'analisi a vista da distanza ravvicinata. I risultati delle analisi fisiche e chimiche hanno confermato che la parti di restauro hanno spesso le medesime caratteristiche degli intonaci quattro- cinquecenteschi, e la medesima porosità è stata rilevata anche nei campioni di stuccatura, che invece all'infrarosso termico rivelano un comportamento differente. Le prove in laboratorio permettono di definire che tra i materiali utilizzati per le malte di restauro, le maggiori differenze di temperatura si rilevano negli impasti addittivati con carbonato di calcio: la stesura con attrezzi che levighino la superficie, e la compattino superficialmente, potrebbe costituire un elemento di rischio per condensazione superficiale, in condizioni microclimatiche critiche, analogamente a quanto succede in caso di ponti termici dovuti alla tecnica costruttiva della struttura.

Note

Strumenti per le prove in laboratorio: Termovisione Avio 700 TVS, LW, microscopio Everest Vit mod. Microviper

Gli autori ringraziano per la preziosa collaborazione la restauratrice Giuseppina Suardi, Nicola Ludwig (Università degli Studi di Milano, IFGA), Wilfredo Torres (Politecnico di Milano, dip. BEST), per il caso di studio di S.ta Maria in Strada Roberto Rinaldi (FLIR, divisione di Milano) e CO.RE.CO s.r.l.

Bibliografia

1. S. Della Torre et aliis, "La conservazione programmata del patrimonio storico architettonico, linee guida per il piano di manutenzione e consuntivo scientifico", Guerini ass. ed, Milano 2003
2. S. Della Torre, E. Rosina, M. Catalano, C. Faliva, G. Suardi, A. Sansonetti, L. Toniolo, "Early Detection And Monitoring Procedures By Means Of Multispectral Image Analysis", Art 2005, Lecce 2005
3. N.Ludwig, V. Redaelli, E. Rosina, "IRT for Mapping Restoration Plasters by Convective Heating", Art 2005, Lecce 2005
4. E. Rosina, N. Ludwig, V. Redaelli, S. Della Torre, S. D'Ascola, M. Catalano, C. Faliva, "IRT analysis on historic buildings: towards a controlled convection heating", Thermosense 2005, Orlando 2005
5. S. Della Torre, E. Rosina, V. Pracchi, G. Suardi, N. Ludwig, V. Redaelli, A. Sansonetti, R. Negrotti, "Le indagini multispettrali per il riconoscimento telemetrico degli interventi di restauro nelle pitture murali", in atti del XXI Convegno Internazionale, Bressanone 2005
6. S. Della Torre, V. Pracchi, E. Rosina, G. Suardi, "L'oratorio di Santa Maria presso San Paolo a Cantù: problematiche di natura conoscitiva e conservativa", in atti del XXI Convegno Internazionale, Bressanone 2005
7. E. Rosina, N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, S. Della Torre, V. Pracchi, G. Suardi, "IRT Monitoring in Planned Preservation of Built Cultural Heritage", in atti del Convegno XVI WCNDT, Montreal 2004
8. E. Rosina, N. Ludwig, V. Redaelli, S. Della Torre, S. D'Ascola, M. Catalano, C. Faliva, "IRT analysis on historic buildings: towards a controlled convection heating", Thermosense 2005, Orlando 2005

12. La Prevenzione del danno e prestazioni dei trattamenti conservativi: metodi diagnostici innovativi per applicazioni in situ

E. Rosina (°), N. Ludwig (), A. Sansonetti (^), F. Gerenzani (')V.Pracchi(°), M. Gargano (*)*

(°) Dipartimento BEST, Politecnico di Milano (*) IFGA, Università degli studi di Milano

(^) ICVBC - CNR, Sezione di Milano (') libero professionista, Milano

ABSTRACT

Recent applications of IR Thermography (IRT) effectively contributed to evaluate in the field the thermal hygrometrical exchanges between stone surface and the environment, by localizing the diffusion of water inside the porous system of the surface external layer. The study via IRT of the evolution of liquid water application onto stone surface by means of the spilling drop and moisture ring methods.

The authors experimented the procedures on 30 specimens of Noto calcarenite, Dorata sandstone, Macedonia marble before and after the application of water-repellent protective products (Paraloid B72, Silirain 50).

The present diagnostic methods are of great feasibility, easy application, low cost: the same thermographic recapture includes many measurements on different spots, therefore it is possible to apply statistics tools to the acquired data and integrate with the data obtained by means of steady procedures (capillary absorption, drying index, contact sponge, etc).

These investigations have suitable applications during the whole knowledge and decision making processes, from the characterization of the materials and the damage assessment, to the evaluation of the applied restoration products. Knowing the thermal-hygroscopic behaviour of the treated material, its exchanges with the environment, variations of performance of the stone/environment system, it is possible to prevent the damage and program the necessary activities for the proper maintenance.

Keywords: IRT, spilling drop, moisture ring, stones, protective products, capillary absorption, evaporative flux, contact sponge

1. Introduzione

Le esperienze già consolidate nel campo della conservazione programmata, hanno permesso di individuare parametri che possano indicare, direttamente o meno, l'insorgere di criticità, siano esse correlabili allo sviluppo del degrado o alla perdita di efficacia dei prodotti applicati. Ciò permette un intervento tempestivo e mirato sull'edificio, conseguendo un cospicuo risparmio economico e soprattutto garantendo l'effettiva conservazione del manufatto: è emerso che la ricognizione periodica con tecniche di analisi multispettrale consente di monitorare nel tempo le prestazioni di un intervento conservativo [1-2]. Le tecniche diagnostiche più utilizzate, fino a questo momento, indagano le modalità di interazione con l'acqua, l'evolversi delle caratteristiche cromatiche [3], la permanenza del prodotto sulla superficie [4]. Recentemente sono state sperimentate tecniche innovative per valutare *in situ* gli scambi termoigrometrici tra superficie ed ambiente [5, 6] che interessano soprattutto lo strato più esterno della superficie.

Per quanto concerne gli scambi tra acqua e materiale lapideo, E' ben noto che si innescano meccanismi di degrado, qualora l'acqua sia presente sulla superficie ed all'interno del sistema poroso di un materiale lapideo, sia naturale che artificiale. Nella quasi totalità dei meccanismi di degrado dei materiali lapidei

che è possibile individuare e modellizzare, l'acqua, in tutti e tre gli stati di aggregazione, sia solido che liquido che gassoso, esercita un ruolo fondamentale; qui di seguito si esemplificano i più importanti:

- veicolare sali solubili nel materiale,
- predisporre un ambiente ottimale per la crescita di microrganismi,
- interagire preferenzialmente con alcuni minerali attraverso meccanismi di idrolisi o di assorbimento chimico- fisico, causando rigonfiamenti, esfoliazioni e scagliature,
- accrescere croste nere e concrezioni.

Per queste ragioni, esposte qui sinteticamente, gli interventi di conservazione si prefiggono l'obiettivo di allontanare o quantomeno ridurre drasticamente il contenuto di acqua sia all'interno che sulla superficie di una muratura, attraverso l'effettuazione di lavori di risanamento dall'umidità o con l'applicazione di prodotti protettivi idrorepellenti. Ciò premesso, si comprende l'importanza di seguire i fenomeni di trasporto di acqua in forma liquida e gassosa sia sulla superficie di un materiale lapideo, che all'interno del suo sistema poroso. Questi studi risultano vitali tanto nell'investigare i meccanismi di degrado innescati ed accelerati dall'acqua, valutando la distribuzione dell'acqua stessa all'interno del sistema poroso, i fenomeni di trasporto, il tempo di permanenza, quanto nel valutare l'efficacia, la nocività e le prestazioni in genere di un trattamento applicato in superficie. In quest'ultimo caso gli studi vengono eseguiti prima e dopo l'applicazione del prodotto e le differenze che si riscontrano vengono messe in relazione con le prestazioni del prodotto stesso. Allo stato attuale gli argomenti sintetizzati in breve, sono stati oggetto di numerose ricerche [7], che si sono avvalse dei risultati ottenuti attraverso misure di assorbimento di acqua per capillarità o per immersione totale, della permeabilità al vapor d'acqua e dell'angolo di contatto statico o dinamico, che hanno condotto alla standardizzazione delle procedure di prova¹. Nel 2001 è stata pubblicata una norma che descrive la procedura per la valutazione delle prestazioni di prodotti idrorepellenti [8-12]. L'insieme delle esperienze scientifiche fino a questo momento acquisite ha avuto però il limite di utilizzare sistemi di indagine applicabili soltanto in laboratorio. Fanno eccezione le misure di assorbimento di acqua a bassa pressione effettuate con il tubo di Karsten o con la cosiddetta

“spugna di contatto” [13, 14]. In questi due casi si eseguono misure puntuali, riferibili ad aree di misura di circa 6/8 cm di diametro. Data la disomogeneità microstrutturale dei materiali lapidei è quindi necessario ricorrere a serie di misure ripetute, per dare una significativa base statistica ai risultati ottenuti con queste due prove.

Il tentativo di superare le problematiche qui sopra esposte ha suggerito di applicare le tecniche di indagine infrarossa (IRT) [5, 6] per seguire l'evolversi degli scambi termo-igrometrici tra materiale lapideo ed ambiente, una volta che si è indotto un assorbimento di acqua da parte del provino, attraverso un meccanismo specifico, come l'applicazione di una spugna imbibita (Moisture Ring), e la deposizione di una goccia di volume calibrato (Spilling Drop).

Sono state messe in evidenza importanti correlazioni tra fenomeni di diffusione dell'acqua, sia in forma liquida che di vapore, il flusso evaporativo, la struttura micro-porosa, l'assorbimento capillare e la temperatura superficiale delle aree interessate dalle misure, con il vantaggio di disporre di sistemi diagnostici che sono anche applicabili in situ,

permettendo di seguire contemporaneamente una serie di misure nella medesima battuta termografica.

Nel presente contributo l'obiettivo è quello di illustrare e misurare l'influenza delle caratteristiche di scambio idrico di tre materiali lapidei, con particolare riferimento alla porosità, alle caratteristiche di assorbimento per capillarità, e alla capacità evaporante, analizzando il comportamento dello strato più superficiale del materiale. Per questo scopo sono state integrate procedure di misura consolidate e normalizzate con due tecniche di ripresa termografica con approccio passivo.

Lo studio del comportamento termoigrometrico dello strato più superficiale del materiale risulta cruciale per valutare gli effetti del degrado dovuto ai fenomeni di trasporto di acqua, ed alle variazioni indotte dall'applicazione di prodotti di restauro. La ricerca è finalizzata a sviluppare le tecniche di misura che possano essere applicate in situ sui materiali

dell'edificio, per misurare direttamente il comportamento termoigrometrico dello strato più superficiale (spessore di inferiore ad un centimetro). Entrambi i metodi che si presentano permettono di analizzare l'evaporazione di piccole quantità di acqua, una volta che vengono applicate sulla superficie.

Il primo metodo, "Spilling Drop", si basa sull'applicazione di acqua senza pressione (lasciando cadere una goccia d'acqua sulla superficie orizzontale del provino). Nel secondo metodo, "Moisture Ring", l'applicazione dell'acqua

avviene a pressione controllata, mantenendo a contatto una spugna umida con la superficie, per qualche minuto [6]. In

entrambi i casi si osserva la diffusione dell'acqua sulla superficie della pietra e nello strato immediatamente sottostante. I risultati delle prove di laboratorio sui tre materiali lapidei (si sono testati 10 provini per ogni tipo di materiale) mostrano una chiara correlazione tra porosità, flusso evaporativo (Drying Index), capillarità e i fenomeni di diffusione dell'acqua all'interno delle microstrutture dello strato più superficiale del materiale.

L'uso di una telecamera sensibile nel vicino infrarosso (1-2.5mm) ha permesso di distinguere l'acqua distribuita sulla superficie del provino dagli effetti di raffreddamento correlati alla sua evaporazione.

Infatti, l'acqua liquida presenta un massimo di assorbanza ottica intorno a 1.94 mm, e il confronto con le immagini riprese nella banda spettrale dell'infrarosso termico (8-14 mm) permette di distinguere la diffusione del calore dovuta all'evaporazione e la diffusione di acqua liquida.

2. Materiali della sperimentazione

2.1 Litotipi

Sono stati utilizzati provini (dimensioni 5x5x2 cm) di tre materiali lapidei differenti per caratteristiche porosi metriche. Pietra di Noto: è una calcarenite giallastra, di natura fossilifera, con una struttura irregolare composta da gusci di microfossili e da cemento di calcite spatica in minuti cristalli (97,5%); sono presenti anche rari cristalli di quarzo e una bassa percentuale di frazione argillosa. Le misure porosimetriche indicano un'elevata porosità aperta (36%),

La normativa vigente e le più avanzate procedure di misura riconosciute in UE [8-12] indicano la porosità, l'assorbimento per capillarità, drying index per caratterizzare i materiali: le misure sono ottenute per prove gravimetriche (nelle ultime due) e valutando l'assorbimento medio sull'intero spessore del provino

caratterizzata da macropori; il diametro dei pori è compreso tra 1-5 mm per una percentuale stimabile in 70% circa. Questa caratteristica determina un'elevata capacità di assorbimento per capillarità.

Pietra Dorata: è un'arenaria di colore giallo dorato, oggetto di coltivazione in due cave situate nel comune di

Manciano. E' ricca in quarzo (dal 30% al 40%), granuli carbonatici micritici (oltre il 30%) con abbondante cemento di calcite spatica, feldspato (superiore al 10%), frammenti di quarzite (3-5%) e piccole quantità di lava spilitica e miche. La porosità aperta è pari al 10% e le classi più frequenti dei raggi dei pori appartengono ai mega-meso pori (0.25-10mm). Marmo Macedone: è un marmo dolomitico originario della Macedonia Jugoslava; ha struttura saccaroide ed è costituito per oltre il 99% da dolomite. La porosità aperta è molto ridotta (0.5%) ed è costituita da macropori; il 70% circa dei pori ha diametro compreso tra 1-7.5 mm. La capacità di assorbimento per capillarità è quindi molto limitata.

2.2 rotettivi

Sono stati scelti prodotti commerciali, procurabili direttamente dalla ditta produttrice e corredati di esauriente scheda tecnica; l'applicazione è stata effettuata per capillarità (4 ore).

Paraloid B72: prodotto commerciale della Röhm & Haas Co., costituito da un copolimero a base di etilmetacrilato

(EMA) / metilacrilato (MA), al 5% in peso in etil acetato.

Silirain 50: prodotto commerciale della Bluestar Silicones, è un formulato a base di resine siliconiche (dimetil-

polisilossani) al 10% in peso in white spirit.

3. Caratterizzazione delle proprietà fisiche dello strato più superficiale dei materiali lapidei

3.1 Spugna di contatto

La prova fornisce la misura quantitativa dell'acqua assorbita dalla superficie mediante il contatto e la pressione costante di una piccola spugna (3 cm di diametro) imbevuta di una quantità nota di acqua.

La procedura di prova è stata messa a punto dal gruppo di ricerca di P. Tiano, CNR-ICVBC di Firenze, ed è stata usata per valutare le differenze di assorbimento di acqua dopo l'applicazione di prodotti di restauro [13, 14]. Nella ricerca

che si presenta le modalità di prova sono state modificate: il tempo di contatto è stato ridotto a 2 minuti, e la superficie di prova è stata mantenuta orizzontale. La quantità di acqua utilizzata per bagnare la spugna è di circa 1.5 ml.

3.2 Drying Index e misura del flusso evaporativo

La prova consiste nel pesare il provino durante il processo evaporativo, dopo averlo portato a saturazione, in condizioni di equilibrio con l'aria (RH 40%, T = 20°C). La finalità è di ottenere la curva di desorbimento [15] che misura lo scambio acqua/vapore tra la superficie e l'aria. La procedura normalizzata (Normal 29/88) è stata modificata: i provini

sono stati posti su una bilancia all'interno di una camera climatica, superando quindi i problemi legati alle variazioni di

RH dell'essiccatore, ed un software dedicato ha fornito il peso del campione in esame ogni minuto per 48h; infine si è ottenuta la curva del flusso evaporativo in funzione del contenuto ponderale di acqua.

Le misure del flusso evaporativo permettono di valutare le differenze di comportamento nei fenomeni di scambio di acqua/vapore fra provino e aria al variare delle caratteristiche microstrutturali della pietra e forniscono una curva, caratteristica per ogni materiale, che permette di visualizzare gli effetti (nocività/non nocività) dei trattamenti protettivi

sulla dinamica di evaporazione.

3.3 Assorbimento d'acqua per capillarità

La prova è stata condotta secondo la procedura descritta nella norma UNI 10859; per determinare le curve di assorbimento e gli indici di assorbimento relativo ICr e assoluto Ica, le pesate sono state effettuate a 10', 20', 30', 1h,

2h, 4h, 24h, 48h, 72h dall'inizio della prova. La misura dell'assorbimento capillare è un parametro atto a verificare

l'efficacia del protettivo nel limitare l'assorbimento d'acqua da parte del materiale lapideo.

3.4 Spilling Drop

Il test consente di misurare le caratteristiche di assorbimento e diffusione di acqua liquida mediante la ripresa video all'infrarosso termico, in condizioni ambientali ottimali (temperatura dell'aria = 23.5±1°C, RH = 30±4 %). La ripresa

termografica è effettuata con approccio passivo, alla frequenza di 1 Hz, per 10 minuti. Durante la ripresa una goccia di acqua distillata (0.02 ml) viene appoggiata sulla superficie del campione. La sequenza delle immagini mostra la diffusione dell'acqua in dipendenza della porosità della superficie e delle capacità idrofobiche del protettivo.

3.5 *Moisture Ring*

La prova consiste nella registrazione di una sequenza termografica durante il test della spugna di contatto. Viene registrato un video per 10 minuti, dal momento in cui la spugna viene rimossa dopo l'applicazione sul provino. La procedura consente di osservare le differenze nella diffusione di acqua sulla superficie, in dipendenza delle caratteristiche porosimetriche della pietra e delle proprietà idrofobiche del protettivo.

In entrambe le prove l'evaporazione dell'acqua causa il raffreddamento delle aree umide, e perciò il contrasto termico tra aree umide e asciutte viene reso maggiormente evidente all'infrarosso termico quando il flusso evaporativo è più elevato [15].

E' stata utilizzata una camera all'infrarosso (Jade Camera CEDIP) sensibile nello spettro di picco di massimo assorbimento dell'acqua liquida (1.934 mm) per distinguere la diffusione del calore (raffreddamento) e quello dell'acqua sulla superficie dei provini. La ripresa ha seguito la stessa procedura utilizzata per i metodi termografici.

4. **Discussione dei risultati**

Tutti i metodi di misura adottati hanno permesso di distinguere i materiali lapidei utilizzati in base alle loro proprietà di scambio con l'acqua. Inoltre si è verificato come la microstruttura del materiale influenzi effettivamente l'assorbimento di acqua, la sua diffusione ed i successivi meccanismi di evaporazione.

4.1 *Spugna di contatto*

I risultati ottenuti dalla sperimentazione permettono di distinguere le capacità di assorbimento d'acqua a tempi brevi dei materiali della sperimentazione in funzione delle loro caratteristiche porosimetriche: le quantità di acqua assorbite dal marmo, dalla Pietra dorata e dalla Pietra di Noto stanno tra di loro in un rapporto 1:5:80 (Tabella 1).

Dopo trattamento per i diversi litotipi si registrano situazioni diverse:

- marmo macedone: l'applicazione dei protettivi non ha portato ad una significativa riduzione della quantità d'acqua assorbita a causa dell'estrema compattezza del materiale stesso. La prova quindi su questo materiale non ha fornito indicazioni significative.
- Pietra dorata: l'applicazione dei protettivi ha portato ad una riduzione della quantità d'acqua assorbita dell'80%. Per entrambi i protettivi si registra la stessa prestazione.
- Pietra di Noto: l'applicazione dei protettivi ha portato ad una netta riduzione della quantità di acqua assorbita a tempi brevi: I due trattamenti fanno registrare una prestazione simile con una riduzione del contenuto d'acqua del 97% (Silirain 50) e del 98% (Paraloid B72).

Tabella 1-Porosità aperta e valori di assorbimento d'acqua per i tre litotipi della sperimentazione (media calcolata su 10 provini).

Pietra	Porosità aperta (%)	Assorbimento d'acqua Wa (g/cm2*min)		
		Tale quale	Silirain 50	Paraloid B72

Marmo	0,5	0,0005	0,0005	0,0003
Pietra Dorata	10	0,0025	0,0005	0,0005
Pietra di Noto	36	0,0393	0,0008	0,0006

Dall'analisi complessiva dei dati raccolti risulta evidente come la prova della spugna sia un utile ausilio per la caratterizzazione dello strato più superficiale del materiale, in grado di verificare l'efficacia dei trattamenti nella riduzione della quantità di acqua assorbita; ma le modalità di esecuzione della prova con tempi di contatto con l'acqua molto brevi non permettono di discriminare significativamente le prestazioni dei due prodotti applicati ad uno specifico litotipo.

4.2 *Drying Index e misura del flusso evaporativo*

Differenti fasi di evaporazione si possono distinguere nei tre litotipi della sperimentazione.

La Pietra di Noto mostra valori di flusso evaporativo superiori al Marmo e alla Pietra Dorata; il valore rimane costante fino a un contenuto ponderale di acqua pari a circa il 7%. Dopo l'applicazione dei protettivi si registra una "drastica" riduzione del contenuto di acqua per imbibizione e di conseguenza una netta riduzione del flusso evaporativo che si assesta, dopo una fase iniziale, su valori pressoché nulli. Entrambi i trattamenti hanno mostrato quindi un'influenza negativa sulle capacità evaporanti della pietra (Fig.1).

Il flusso evaporativo sui campioni in Marmo Macedone risulta pressoché nullo sia prima che dopo trattamento.

La Pietra Dorata mostra un comportamento intermedio: essa ha un valore iniziale elevato di flusso evaporativo in cui la maggior parte dell'acqua contenuta evapora. Di conseguenza, in una fase successiva del processo, il valore di flusso evaporativo diventa simile a quello del marmo. Le misure effettuate dopo trattamento hanno messo in evidenza le differenze di prestazione tra i due prodotti. L'applicazione del Silirain 50 ha portato ad una riduzione del contenuto d'acqua dopo imbibizione del 23% ed una riduzione del valore di flusso evaporativo a saturazione del 76%. Nella fase iniziale del fenomeno di desorbimento si registra una brusca diminuzione del tasso di evaporazione che si assesta su valori pressoché nulli. L'applicazione del Paraloid B72 non ha modificato il contenuto d'acqua dopo imbibizione ma le mutate condizioni porosimetriche superficiali del materiale hanno ridotto del 43% il valore del flusso evaporativo a saturazione. Nella fase iniziale il fenomeno di evaporazione va ad interessare la parte interna del materiale, la diminuzione del tasso di evaporazione ha lo stesso andamento dei provini non trattati; questo sta ad indicare che il trattamento non ha modificato né la struttura porosimetrica interna né la capacità di traspirazione della pietra (Fig. 2).

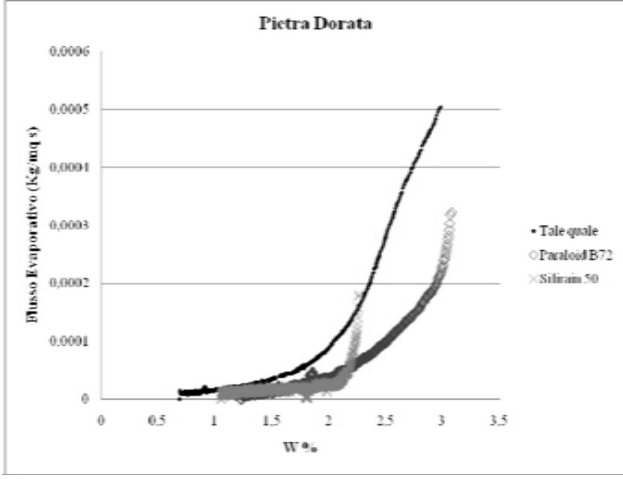
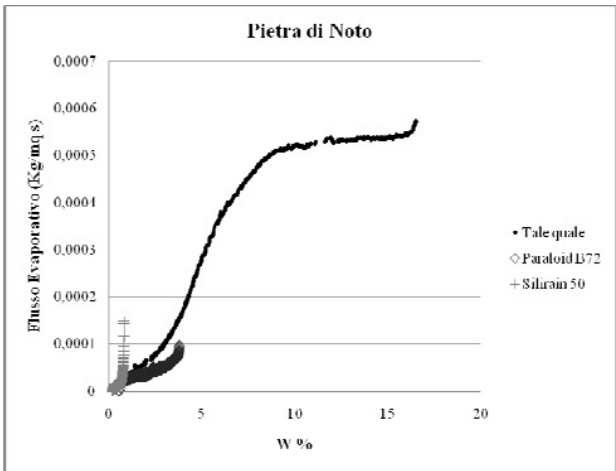


Fig. 1- Grafico del flusso evaporativo in funzione del contenuto e di acqua prima e dopo trattamento Pietra di Noto. Fig. 2 - Grafico del flusso evaporativo in funzione del contenuto e di acqua prima e dopo trattamento Pietra Dorata.

L'esame dei valori di Indice di Asciugamento (Drying index) dopo 24 h secondo NorMal 29/88 ha permesso di avvalorare i risultati ottenuti dalle misure di flusso evaporativo e di confrontare la velocità di asciugamento dei litotipi pur essendo molto diversa la quantità d'acqua in essi contenuta e l'effetto dei prodotti applicati.

Tabella 2- Porosità aperta e valori di Indice di Asciugamento per i tre litotipi della sperimentazione (media calcolata su 10 provini).

Pietra	Porosità aperta (%)	Drying Index		
		Tale quale	Silirain 50	Paraloid B72
Marmo	0,5	0,328	0,350	0,283
Pietra Dorata	10	0,504	0,831	0,647
Pietra di Noto	36	0,442	0,534	0,671

Nelle prime 24 ore del fenomeno evaporativo il marmo mostra la cinetica più rapida sia per la sua particolare porosità che per le scarse quantità di acqua messe in gioco, mentre l'arenaria presenta una minore tendenza a lasciare evaporare l'acqua assorbita. A differenza di quanto fatto registrare sul marmo l'applicazione dei protettivi sugli altri litotipi della sperimentazione ha portato ad una riduzione delle naturali capacità evaporanti con la prestazione peggiore fatta registrare da Silirain 50 sulla Pietra dorata (Tabella 2).

Dall'analisi complessiva dei dati raccolti risulta evidente come il metodo illustrato, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei diversi tassi di evaporazione, si può considerare un valido ausilio per la caratterizzazione delle proprietà fisiche sia dello strato superficiale che interno dei materiali lapidei e per la valutazione della nocività dei trattamenti applicati.

4.3 Assorbimento d'acqua per capillarità

La prova di assorbimento per capillarità ha determinato le curve rappresentate in Fig.3-4-5, dove Qf è la quantità di acqua assorbita per unità di superficie alla fine della prova (dopo 72 ore). Le curve di assorbimento dal punto di vista qualitativo, sono sufficientemente chiare nel dimostrare le differenze di comportamento nelle cinetica di assorbimento d'acqua dei tre litotipi e le differenze di prestazione tra i due prodotti considerati. Prima del trattamento le quantità di acqua assorbite alla fine della prova dai tre litotipi (Tabella 3) stanno tra loro in un rapporto circa: 1:16:60. Dall'analisi dell'andamento delle curve si può osservare come la Pietra di Noto raggiunga l'asintoto, ovvero la massima quantità di acqua assorbibile, in tempi molto brevi (30 minuti) (Fig. 4), mentre per la Pietra Dorata occorrono 8 ore prima di raggiungere un plateau (Fig. 3). I valori degli indici di assorbimento assoluto Ica mostrano chiaramente sia le similitudini che le differenze di comportamento dei tre litotipi non trattati.

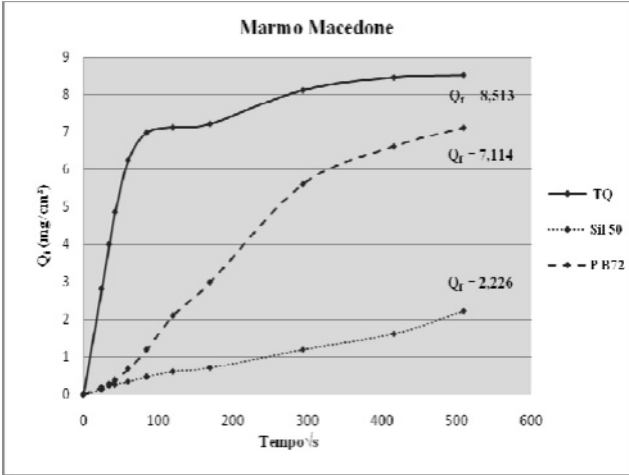


Fig.3-Curva di assorbimento capillare Marmo Macedone

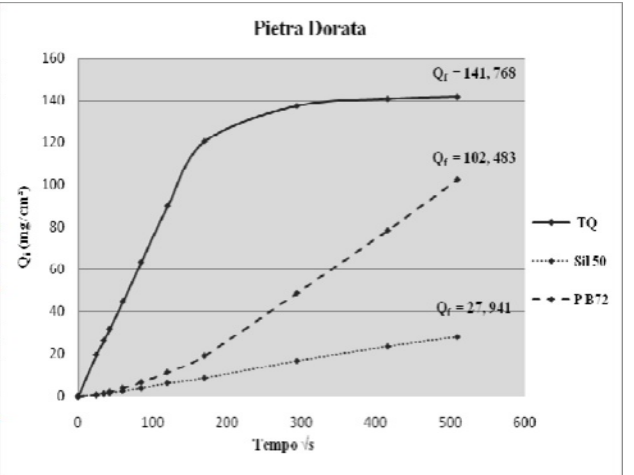


Fig.4-Curva di assorbimento capillare Pietra Dorata

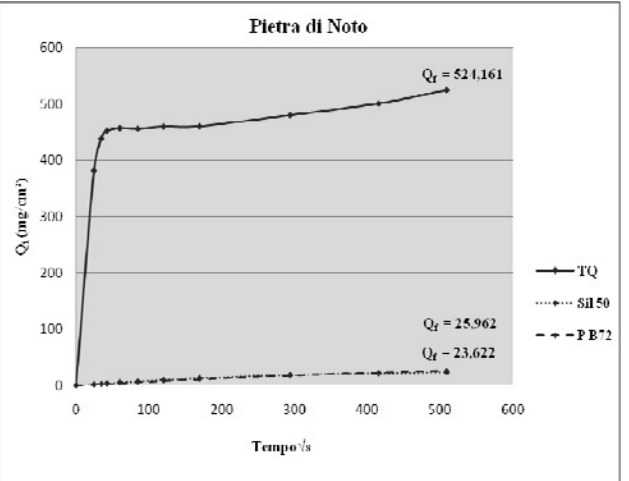


Tabella 3-Quantità di acqua assorbita al tempo finale e valori di Indice di assorbimento assoluto Ica per i litotipi non trattati.

Pietra	Of	ICa
Marmo	8,51	0,37
Pietra	141,76	0,78
Pietra di	524,16	0,88

Tabella 4-Quantità di acqua assorbita al tempo finale e valori di Indice di assorbimento relativo Icr per i litotipi trattati

Pietra	Qf (mg/cm²)		ICr	
	Sil5	PB72	Sil5	PB7
Marmo	2,22	7,11	0,14	0,62
Pietra Dorata	27,9	102,4	0,12	0,38
Pietra di Noto	23,6	25,96	0,03	0,03

I risultati ottenuti dopo trattamento sui provini in marmo macedone e in pietra dorata mostrano come la prestazione migliore è offerta da Silirain 50 che ha portato ad una netta riduzione dell'assorbimento d'acqua per tutta la durata della prova; di contro Paraloid B72 col trascorrere del tempo a contatto con l'acqua perde la sua efficacia protettiva (Fig.3-4). A differenza di quanto fatto registrare sugli altri litotipi della sperimentazione, sulla Pietra di Noto i due polimeri hanno fornito prestazioni molto simili. Le curve di capillarità caratteristiche, riportate in Fig. 5, mostrano come dopo trattamento la quantità d'acqua assorbita si riduce notevolmente (95%) senza raggiungere un valore costante neanche dopo 72 ore a contatto con l'acqua.

La prova di assorbimento per capillarità si è dimostrata un ottimo ausilio per la caratterizzazione del materiale lapideo e

per la verifica dell'efficacia dei protettivi nel ridurre la quantità di acqua assorbita a seconda del materiale su cui viene applicato, in particolare la precisione e la sensibilità della misura è testimoniata dagli ottimi risultati ottenuti su un substrato così critico come quello del marmo macedone caratterizzato da una porosità totale aperta pari allo 0,5%.

4.4 Spilling Drop

Le differenze di diffusione di acqua sulla superficie dei provini prima e dopo trattamento sono rappresentate chiaramente in Fig. 6. La geometria della goccia subito dopo l'applicazione sulla superficie del provino e alla massima estensione si differenzia per i diversi litotipi della sperimentazione. Sulla superficie del marmo l'area bagnata è la più piccola tra quelle misurate, ha una forma circolare regolare, e l'alone (causato dalla diffusione di acqua o dall'effetto di raffreddamento) è limitato ad un contorno sottile intorno alla goccia.

L'applicazione dei protettivi non ha mutato le già basse capacità di assorbimento del litotipo come si può vedere dalle piccole dimensioni delle aree bagnate, la goccia ha forma circolare regolare e presenta intorno un sottilissimo anello dovuto al raffreddamento della pietra. Sulla superficie della Pietra Dorata l'area bagnata risulta più estesa di quella della superficie del marmo ed ha contorno e forma irregolare. Dopo trattamento le mutate condizioni superficiali della pietra hanno portato ad un cambiamento nella geometria delle gocce che da irregolare è diventata regolare con andamento circolare, così come regolare è il suo contorno. Sulla superficie della Pietra di Noto l'area bagnata è la più ampia tra i litotipi testati ed ha contorno e forma regolare. Dopo trattamento si registra una netta riduzione dell'area della goccia rispetto ai provini non trattati: 61,52% per il Silirain 50 e 63,31% per il Paraloid B72; per tutta la durata della ripresa (10 minuti) non si riscontrano variazioni dimensionali della goccia indice che entrambi i trattamenti mantengono la stessa efficacia protettiva a tempi brevi.

Tabella 5-Dimensione media dell'area della goccia subito dopo l'applicazione sulla superficie dei provini e alla massima estensione. Contenuto di acqua della goccia 0,02ml.

Materi ali	Tale quale			Trattato					
				Silirain 50			Paraloid B72		
	Area	Area	% di increment	Area	Area	% di increment	Area	Area	% di increment
Marmo	15,24	19,47	27%	16,07	17,54	9,14%	17,30	19,83	14,62%.
Pietra Dorata	16.89	35.35	109%	15.10	15.33	0%	18.25	20.25	10%
Pietra	63,33	119.02	87.93%.	16,10	16,10	0%	15,43	15.89	0%

Legenda= Area T1: Area della goccia al tempo iniziale; Area T2: Area della goccia alla massima estensione

4. 5 Moisture ring

Dopo l'applicazione della spugna di contatto, la misura dinamica della variazione di temperatura permette di ottenere la valutazione della propagazione di acqua sulla superficie dei provini. L'estensione e la forma dell'area bagnata dipende dalle caratteristiche porosimetriche dei materiali e dall'idrofobicità dei prodotti applicati. Di conseguenza sono stati selezionati rispettivamente i termogrammi alla massima estensione per caratterizzare i materiali ed i termogrammi all'inizio della prova per valutare l'efficacia protettiva dei prodotti (Fig.7).

Tabella 6 - Misure del perimetro e dell'area bagnata alla massima estensione dopo applicazione della spugna (media di 10 provini).

Materiali	Porosità aperta	Moisture Ring Area	Moisture ring Perimetro
Marmo	0,5	879,34	103,82
Pietra Dorata	10	851,81	107,84
Pietra di Noto	36	1263,18	128,61

Sulla superficie del marmo l'area bagnata è la stessa della spugna e i bordi sono irregolari con un sottile anello dovuto al raffreddamento della pietra. Il termogramma alla massima estensione permette di visualizzare l'effetto del basso assorbimento tipico dei materiali a bassa porosità. Dopo trattamento l'area bagnata è la stessa della spugna e sulla superficie non si registra alcun fenomeno di raffreddamento a testimonianza dell'assenza di assorbimento d'acqua da parte del materiale. Sulla superficie della Pietra Dorata, l'effetto di raffreddamento è il più piccolo tra tutti i campioni e il contorno dell'area bagnata è totalmente irregolare. Dopo trattamento l'area bagnata è la stessa della spugna e sulla superficie non si registra alcun fenomeno di raffreddamento a testimonianza dell'assenza di assorbimento d'acqua da parte del materiale. Sulla superficie della Pietra di Noto l'area bagnata è la più ampia tra tutti i materiali della sperimentazione. Il termogramma alla massima estensione permette di visualizzare l'effetto dell'elevato assorbimento che causa la grande diffusione di acqua e di conseguenza l'elevata diffusione di calore (a causa dell' evaporazione). Dopo trattamento l'area bagnata è la stessa della spugna e sulla superficie non si registra alcun fenomeno di raffreddamento a testimonianza dell'assenza di assorbimento d'acqua da parte del materiale.

Considerando che la quantità di acqua assorbita dal marmo e dalla pietra dorata sono simili si può affermare che i metodi di indagine termografici permettono di distinguere tra le diverse caratteristiche porosimetriche superficiali: di fatto l'arenaria ha una maggior varietà nelle dimensioni dei pori rispetto al marmo e alla calcarenite.

5. Note conclusive: potenzialità dei metodi e criticità del portare in situ questi sistemi

Le procedure presentate appartengono a tre differenti classi di misure, e la ricerca permette di apprezzarne l'integrabilità grazie alla congruenza dei risultati. Le procedure termografiche sono innovative, e la loro validità è dimostrata dal "crossing data" con tecniche standardizzate. Di particolare utilità sono stati a questo riguardo i test gravimetrici di laboratorio, che hanno permesso di apprezzare la stima a cui si è giunti mediante metodi termografici della capacità di assorbimento e di evaporazione dell'acqua liquida. Inoltre l'integrazione di IRT con il metodo della spugna di contatto ha permesso di evidenziare i fattori che potrebbero avere un ruolo preponderante per l'identificazione delle condizioni di rischio, ad esempio la distribuzione e misura dei pori dello strato più superficiale del materiale, dove il ciclo di scambio di acqua con l'ambiente è più attivo rispetto a quanto avviene a qualche centimetro più in profondità. I metodi presentati permettono di distinguere qualitativamente, ma con buona precisione attraverso la misura della temperatura sulla superficie, la differenza di porosità dello strato più superficiale dei materiali e l'efficacia protettiva dei trattamenti. E' ben noto che i processi di deterioramento, sia sulla pietra trattata che non, normalmente hanno origine sulla superficie; è proprio sulla superficie che interviene il metodo di ripresa della spugna di contatto. Con questo tipo di controlli effettuati nel tempo secondo protocolli conservativi, il restauratore/conservatore acquisisce gli strumenti per valutare la frequenza degli interventi conservativi, prevenendo la formazione dei danni.

Visti i risultati positivi raggiunti in laboratorio attualmente è allo studio l'esportazione in cantiere delle procedure: se da un punto di vista teorico non sussistono controindicazioni, le prime applicazioni hanno permesso di mettere in luce difficoltà e limiti legati al fatto che il cantiere è un sistema complesso dove variabili come il clima, il degrado e gli interventi di conservazione effettuati in passato sulla pietra svolgono un ruolo decisivo sull'acquisizione, elaborazione ed interpretazione dei risultati.

Riferimenti bibliografici

- [1] S. Della Torre, E. Rosina, M. Catalano, C. Faliva, G. Suardi, A. Sansonetti, L. Toniolo, 2005, *Early Detection And Monitoring Procedures By Means Of Multispectral Image Analysis*, Art 2005, Lecce 2005
- [2] N. Ludwig, V. Redaelli, E. Rosina, *IRT for Mapping Restoration Plasters by Convective Heating*, Art 2005, Lecce 2005
- [3] Raccomandazione NorMal 43/93 "Misure colorimetriche di superfici opache".
- [4] Manucci E., Zerbi G., Bellini A. "Nuove metodologie spettroscopiche per lo studio di protettivi per materiali lapidei" in *Arkos: scienza e restauro*, n°7, luglio-settembre 2004, Nardini Editore, Firenze, pp. 28-35.
- [5] E. Rosina, N. Ludwig, S. Della Torre, S. D'Ascola, C. Sotgia, P. Cornale, 2008, *Thermal and hygroscopic characteristics of restored plasters with different surface textures*, Materials evaluation, ASNT Official Journal, Materials Evaluation (Columbus – OH, USA), dicembre 2008
- [6] N. Ludwig, E. Rosina, A. Sansonetti, 2009, *New IRT procedures for the evaluation of stone's hygroscopic characteristics in buildings*, Atti del 10th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, Firenze 2009
- [7] S.J. Gregg, K. S. W. Sing, 1982, *Adsorption, surface area and porosity*, 2a ed, Academic Press, London
- [8] EN 1015-19 (1998: Methods of test for mortar for masonry: determination of water vapour of hardened rendering and plastering mortars)
- [9] EN 1015-18 (2004: Methods of test for mortar for masonry: water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar)
- [10] ASTM E96 Procedure A and B Dry Cup test
- [11] UNI 10859 (Materiali Lapidari Naturali ed Artificiali. Determinazione dell'Assorbimento d'Acqua per capillarità) 2000 - Milano [12] UNI 10921/2001 "Materiali lapidei naturali e artificiali. Prodotti idrorepellenti. Applicazioni su provini e determinazione in laboratorio delle loro caratteristiche"
- [13] C. Pardini, P. Tiano, 2003, *Valutazione in situ dei trattamenti protettivi per il materiale lapideo. Proposta di una nuova semplice metodologia*, in *Arkos* 4/03, Nardini ed. Firenze 2003 (Italy), pp.32-38
- [14] D. Vandevorde, M. Pamplona, O. Schalm, Y. Vanhellemont, V. Cnudde, E. Verhaeven, 2009, *Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption*, Journal of Cultural Heritage, Volume 10, Issue 1, January-March 2009
- [15] N. Ludwig, E. Rosina, 1999, *Active and Passive thermography to detect moisture in building materials*, 5th International Workshop on "Advanced Infrared Technology and Applications", Venezia 1999

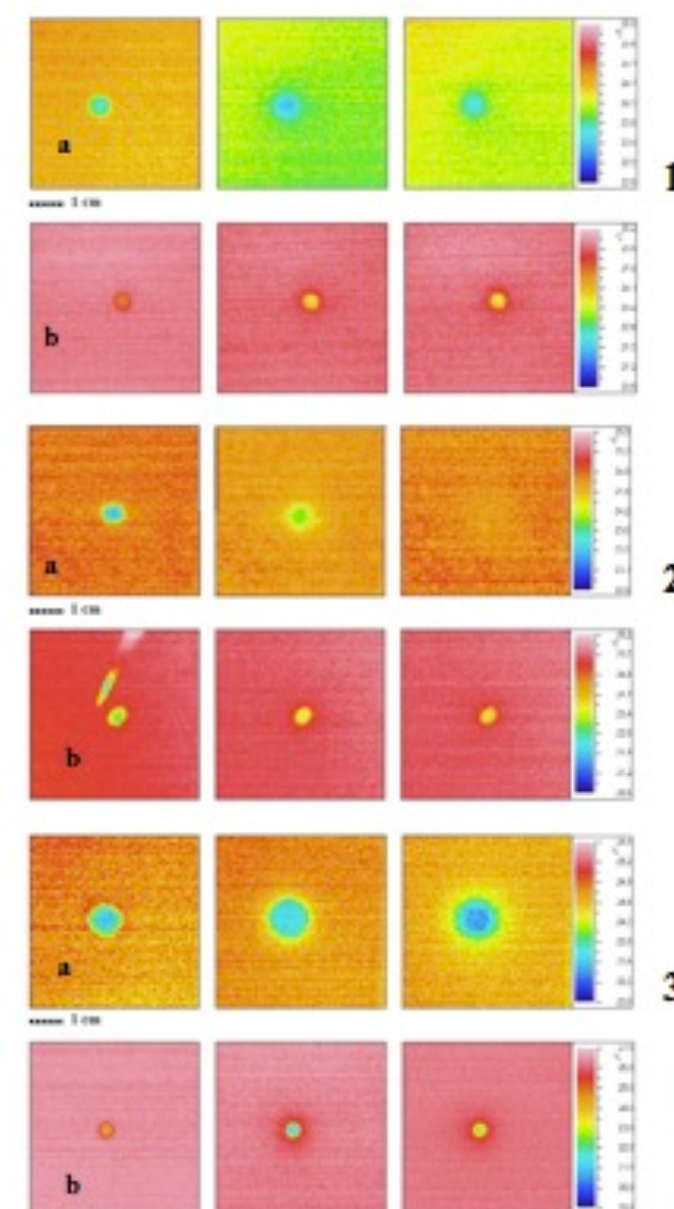


Fig. 6-Termogrammi iniziale, alla massima estensione e finale registrati sui provini tal quali (a) e trattati (b). Range di temperatura 22.8-25°C, emissività tra 0.89 e 0.95. Marmo(1), Pietra Dorata (2), Pietra di Noto (3).

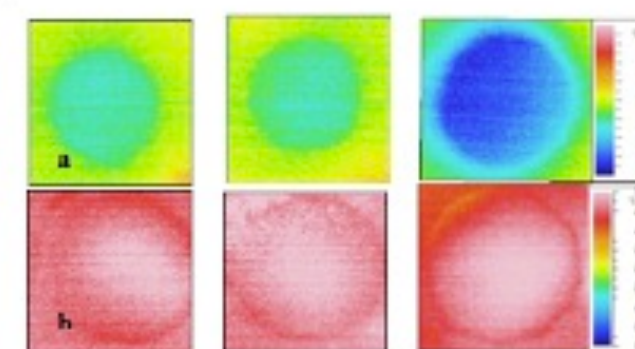


Fig.7- Termogrammi dell'area bagnata dopo l'applicazione della spugna di contatto prima (a) e dopo trattamento (b). Rispettivamente da sinistra : marmo, Pietra Dorata, Pietra di Noto.

13. METODI DI ANALISI PRELIMINARE DEL DEGRADO PER I BENI CULTURALI

Elisabetta Rosina - Politécnico di Milano

Introduzione

Nella letteratura scientifica degli ultimi decenni è frequente la richiesta di sviluppo di tecniche diagnostiche legate all'evolversi delle concezioni di restauro. La valutazione delle prestazioni residue di elementi in opera e degli stessi edifici è il punto di partenza per ogni possibile progetto di riuso e valorizzazione del patrimonio costruito.

Senza un esame attendibile di ciò che il manufatto può sostenere, senza una valutazione attenta di quali cambiamenti occorra prevedere, non è neanche possibile garantire la conservazione materiale dell'oggetto. Dal punto di vista economico questo è il miglior utilizzo della diagnostica perché permette di orientare il progetto verso usi sostenibili dall'edificio e quindi di ottimizzare le prestazioni residue, calibrando l'intervento sulle effettive parti mancanti o insufficienti. La prevenzione del degrado, e quindi la valutazione dei fattori di rischio che possono inficiare la durata dei materiali e la prestazione degli elementi costituenti il sistema edificio, è inoltre un elemento imprescindibile per la quantificazione economica dei costi per il suo mantenimento.

Sino a pochi anni fa, le applicazioni più diffuse sono state per la maggior parte di diagnostica, preliminare o approfondita, nell'ambito del processo di conoscenza del manufatto, a monte del progetto di restauro. Più recentemente si è sviluppata una più ampia accezione della conservazione dei beni culturali: l'obiettivo principale sta nell'evitare il più possibile l'intervento vero e proprio, a favore della esecuzione di piccole operazioni di manutenzione preventiva, che possano allontanare nel tempo il momento ed i costi di operazioni più drastiche, altrimenti indispensabili.

La prevenzione del degrado viene messa in campo con l'attività di monitoraggio, come controllo periodico dello stato di conservazione che può condurre a segnalazioni di nuovi fenomeni insorti e/o alla necessità di trattamento.

Coerentemente agli orientamenti teorici, anche i criteri stessi dell'approccio diagnostico [1] sono mutati: si fa sempre più strada l'idea che l'indagine non sia la registrazione episodica dei dati relativi ad una particolare patologia, ma un controllo periodico che consenta di evincere le caratteristiche del processo che si sviluppa nel tempo, permettendo con ciò una sicura individuazione della causa e supportando la decisione se intervenire o no.

L'evoluzione del concetto di controllo conduce alla necessità di avere protocolli e procedure di indagine che rispondano ai requisiti di affidabilità e ripetibilità delle prove in campo, rapidità di esecuzione ed applicabilità su aree estese, rilascio di informazioni in tempo reale, esecuzione senza contatto con la superficie dell'oggetto. Non da ultimo, un requisito considerato importante per l'applicabilità al patrimonio diffuso è il modesto impegno economico per ottenere essenziali valutazioni preliminari, semi-qualitative, ma indicative dell'evoluzione dei processi che causano, o possono causare, il degrado.

Campo di applicazione

Le ricerche condotte dall'unità Laboratorio mobile del Laboratorio Sperimentale BEST, sono focalizzate sullo sviluppo e integrazione di tecniche non distruttive per il monitoraggio del degrado e del microclima, e per il controllo dei materiali di restauro in opera; nello stesso ambito viene messa a punto la standardizzazione delle procedure già consolidate, basate su tecniche telemetriche e qualitative, ma sempre più mirate e quantitative in funzione del livello di conoscenza acquisito, e fondate sull'integrazione di più metodiche

non distruttive, o minimamente distruttive, per ottenere la validazione dei dati misurati.

Le applicazioni più frequenti riguardano la diagnosi preliminare per orientare il progetto, realizzare la messa in sicurezza di superfici ed elementi a rischio e la quantificazione dei costi dell'intervento, e sono soprattutto indirizzate alla mappatura degli elementi strutturali e loro discontinuità non a vista (ad esempio in murature intonacate), la mappatura di infiltrazioni di acqua e umidità di risalita, il riconoscimento di superfici a rischio per la loro conservazione in severe condizioni climatiche (elevata UR e basse temperature dell'aria), il monitoraggio e studio delle condizioni microclimatiche, soprattutto in previsione delle variazioni d'uso e adeguamento impiantistico.

E' infatti di particolare interesse sia per la ricerca sia per le applicazioni in campo, il controllo nel tempo delle variazioni termoigrometriche nel microclima e sulle superfici; la presenza di gradiente termoigrometrico tra ambiente e superficie costituisce la condizione principale di scambio di acqua tra il "sistema ambiente" e "l'oggetto contenuto," con conseguente innesco di fenomeni di degrado. La diagnosi precoce di ogni variazione termica che appare sulla superficie è da ritenersi significativa dello sbilancio energetico che si è venuto a creare nei sistemi e pertanto costituisce una sorta di "allarme" preventivo per il danno che, prima o poi, verrà prodotto.

Gli accertamenti preliminari sono particolarmente utili al riconoscimento dei fattori di rischio legati sia alle caratteristiche intrinseche dell'elemento indagato, sia all'interazione tra più elementi, sia all'ambiente, come avviene ad esempio nella localizzazione di superfici soggette a evaporazione, condensazione e flussi d'aria che lambiscono le pareti, a gradienti termici differenti dovuti alla presenza non a vista di materiali differenti, che possono essere responsabili di degrado differenziale in condizioni ambientali particolari [2].

Localizzazione e valutazione di elementi strutturali e del quadro fessurativo

La lettura delle geometrie e dei materiali della tessitura muraria è fonte di preziose informazioni per la conoscenza dell'edificio, permette di individuare interventi precedenti, che talvolta addirittura hanno modificato lo schema di distribuzione dei carichi, senza che siano state predisposte le opportune misure per il loro contenimento. I rilievi e la ricerca storica rivelano molti dei cambiamenti occorsi nel tempo, ma se le finiture sono in opera è indiscusso che alcuni "dettagli", quali l'ammorsamento delle murature, l'apparecchio costruttivo delle volte, la presenza di elementi metallici di consolidamento o messi a presidio, per citarne solo alcuni, non possano essere valutati senza saggi distruttivi. Mediante termografia all'infrarosso (IRT) si possono ottenere immagini immediatamente leggibili degli strati che giacciono sotto gli intonaci, anche nel caso questi ultimi siano colorati o affrescati. Non si tratta di una lettura diretta dei conci, ma della "impronta" termica che essi lasciano sulle superfici, se sottoposte ad opportuno riscaldamento, grazie alle diverse proprietà termiche dei materiali che li costituiscono [3]. Nelle indagini preliminari, quando i tempi sono ridotti e spesso sono disponibili solo scarse risorse finanziarie, è uno strumento insostituibile per una rapida localizzazione delle anomalie nella tessitura. L'approccio più conveniente è quello attivo, perché le condizioni climatiche non sempre consentono una chiara identificazione della tessitura non a vista. I migliori risultati si ottengono su murature costituite da materiali dotati di proprietà termiche molto diverse tra loro, come ad esempio pietra e malta, e in questo caso si ottengono buoni risultati anche con l'approccio passivo, poiché è sufficiente sfruttare l'irraggiamento solare diretto o i flussi convettivi naturali; l'indagine può essere ottimizzata anche su materiali più simili, come il cotto, la malta d'argilla, gli intonaci e il legno [4, 5] mediante l'uso di modelli numerici degli scambi



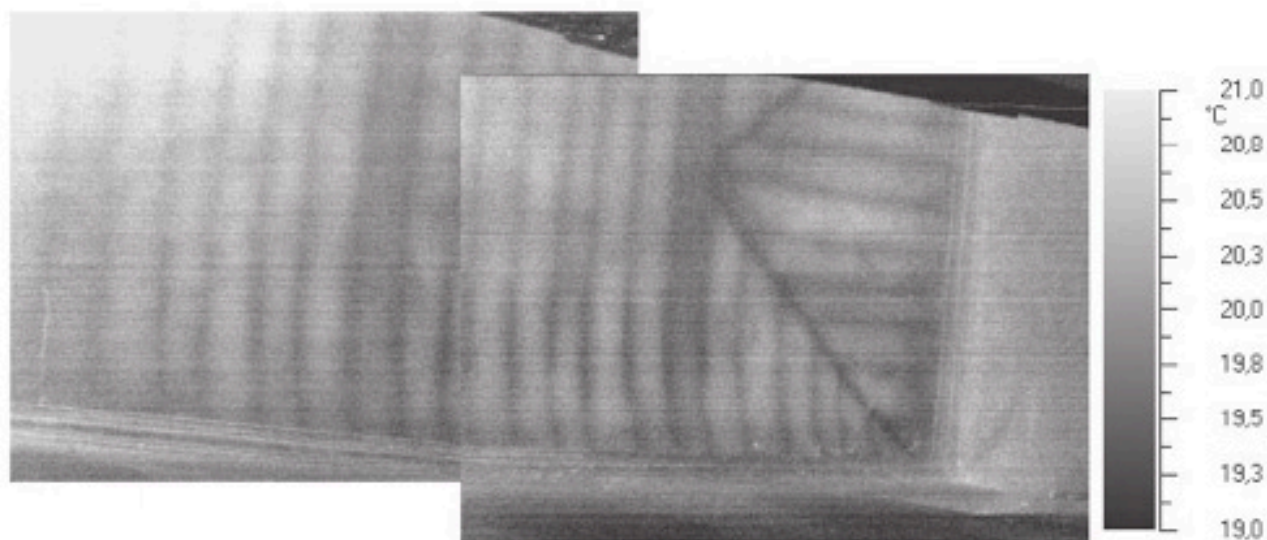
Villa Mirabello, entrata principale

termici tra la muratura e l'ambiente e di trasporto del calore all'interno della struttura.

Nel caso di materiali con proprietà termiche ben differenziate i risultati sono ottenibili più facilmente, poiché la risposta dei materiali è così diversa che si ottengono immagini molto contrastate anche nel caso di un'elevata approssimazione dei tempi di riscaldamento e di ripresa.

Ad esempio, nel caso di studio di Villa Mirabello, a Monza, la lettura della tessitura della volta dello scalone ha permesso di convalidare le ipotesi storiche, basate

sull'analisi archivistica, riguardo ad un rifacimento della struttura nel corso del XVII secolo [6, 7], e di accertare che le lesioni presenti interessano lo strato più superficiale dell'intonaco. Infatti le riprese termografiche realizzate in modalità passiva (fig. 2), dopo poche ore di irraggiamento solare sulla copertura, hanno messo in evidenza la presenza di un'orditura lignea a cui la volta incannucciata è stata sospesa. Le centine sono integrate da archi di spessore maggiore che si rilevano come zone più scure (più fredde) nel mosaico dei termogrammi.

mosaico dei termogrammi della volta dello scalone di Villa Mirabello, a Monza. Condizioni ambientali: $T^{\circ} = 17^{\circ}\text{C}$, UR= 76%

la volta dello scalone

il termogramma inquadra una parte della volta, interessata da lesioni del solo strato superficiale dell'intonaco. Ripresa effettuata in fase di riscaldamento per convezione, dopo 50 minuti dall'inizio del riscaldamento; condizioni ambientali: $T^{\circ} = 25^{\circ}\text{C}$, UR= 45%



In modalità attiva, applicando un riscaldamento per convezione all'intradosso della volta, è stato possibile ottenere una mappatura delle lesioni principali, non facilmente riconoscibili nello spettro del visibile a distanza di alcuni metri (fig. 3 e 4). Tali lesioni sono ortogonali alla struttura portante e sono dovute al degrado dell'intonaco nei punti in cui l'incannucciato presenta soluzioni di continuità.

Il rilievo della tessitura muraria dello scalone è stato inoltre ottenuto con una modesta sollecitazione

termica, grazie all'irraggiamento solare all'esterno. Le informazioni ottenute riguardano anche la distribuzione del degrado dell'intonaco, che è risultato interessato da distacchi diffusi (fig. 6) soprattutto da terra sino a circa 3 m dal piano di calpestio, e all'ultimo piano, tra le due finestre inquadrare. Le zone in cui la finitura non è più aderente al substrato appaiono all'infrarosso termico come aree più calde, ed impediscono di apprezzare l'orditura della muratura sottostante.



prospetto esterno dello scalone

mosaico dei termogrammi del prospetto esterno dello scalone. Condizioni ambientali durante la ripresa: $T^{\circ} = 20,6^{\circ}\text{C}$, UR= 67%.

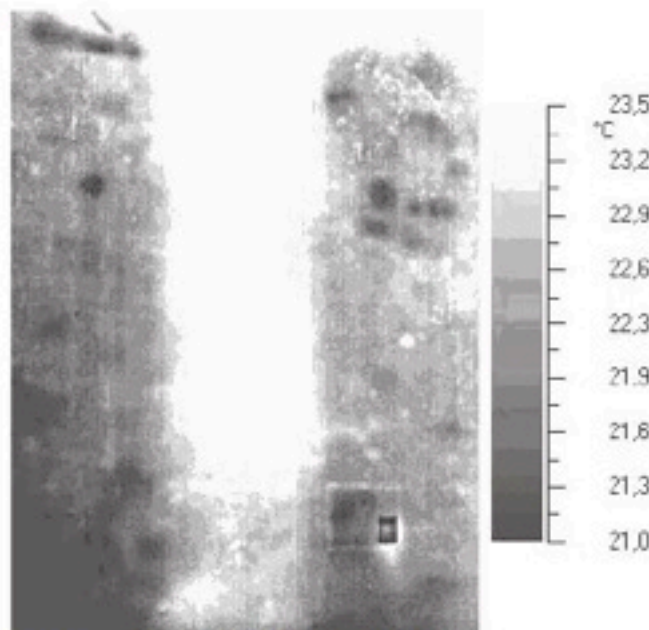




parete sud, l'intonaco di presenta molto degradato a causa dell'infiltrazione di acqua dalla copertura

La IRT permette di identificare fino a diversi centimetri di profondità le tracce degli elementi che possono costituire una debolezza intrinseca. La tecnica di indagine in questo caso è da considerarsi propria della diagnostica approfondita, richiedendo un approccio attivo; tuttavia, se la sorgente della stimolazione è l'irraggiamento solare, è pur vero che un'opportuna progettazione della prova può contenere i costi tanto da poterli paragonare a quelli di una diagnostica meno sofisticata. Occorre solo ottimizzare i tempi della ripresa, avendo calcolato opportunamente l'entità della sollecitazione termica in funzione delle condizioni di irraggiamento solare e l'orientazione della parete su cui si intende effettuare le prove.

Anche all'interno è comunque possibile ottenere una sufficiente stimolazione termica per individuare cavità e riduzioni dello spessore della muratura, che costituiscono elementi di vulnerabilità della struttura. In fig. 8 si presenta un esempio dell'applicazione di IRT per l'individuazione di una larga canna fumaria, dopo un riscaldamento di circa 60 minuti per convezione. La tessitura della muratura risulta in cotto con inserimento di elementi lapidei.



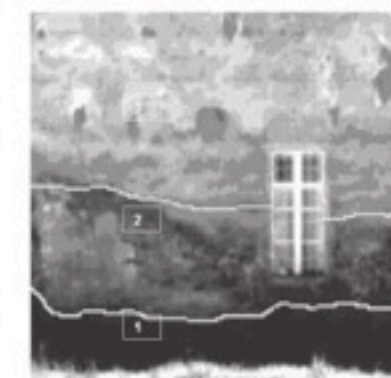
mosaico dei termogrammi, $T^a = 25^\circ\text{C}$, UR = 58%

Localizzazione di infiltrazioni di umidità dalle coperture e di umidità di risalita

L'infiltrazione di acqua nelle strutture è una delle principali cause di degrado delle strutture. Si tratti di risalita capillare o di perdite di impianti o dal tetto, o di fenomeni di condensazione, la presenza di acqua e i suoi cambiamenti di stato nelle murature innescano meccanismi di aggressione fisica e chimica (gelo, riduzione delle caratteristiche termiche e meccaniche, trasporto e cristallizzazione dei sali solubili) che sono responsabili del degrado dei materiali. Pertanto qualsiasi intervento di conservazione dovrà prevedere una campagna diagnostica per valutare il tenore di umidità contenuto nelle murature, le vie di apporto



Corte Castiglioni, Mantova. Fig. 10 La battuta termografica effettuata a seguito di abbondanti precipitazioni atmosferiche ha permesso di localizzare il fronte di risalita dell'umidità. Le prove gravimetriche condotte su campioni prelevati nelle zone 1, 2, e 3 hanno avuto come risultato valori di contenuto d'acqua rispettivamente di 16.2%, 8.6%, 3.8%; condizioni ambientali durante la battuta termografica $T^a = 18.5^\circ\text{C}$, UR = 72%



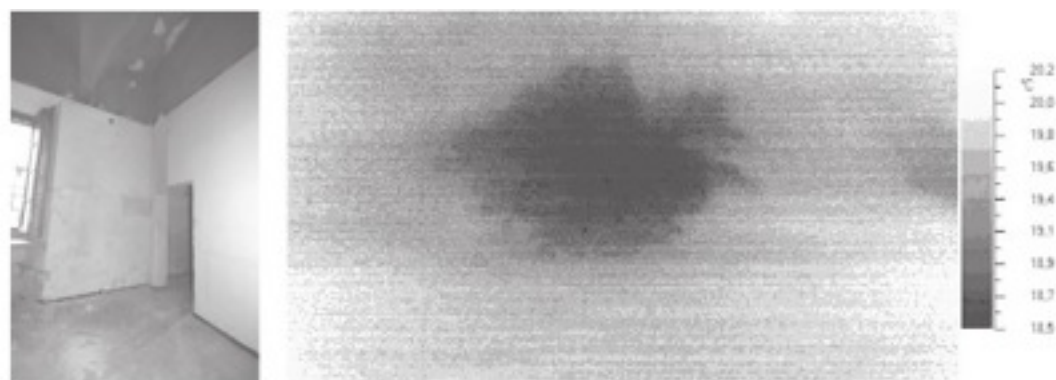
d'acqua alla struttura, l'interazione della struttura stessa con l'ambiente circostante ed in particolare con le variazioni (giornaliere, stagionali, annuali) dei parametri climatici e microclimatici. In base alla conoscenza approfondita di questi elementi sarà possibile progettare, se necessario, un corretto intervento di risanamento dell'umidità che sarà finalizzato al controllo delle variabili microclimatiche e/o a bloccare l'apporto diretto di umidità direttamente alla fonte dell'infiltrazione. Per individuare la causa che determina l'anomala presenza di acqua nei materiali è indispensabile innanzitutto procedere alla mappatura della distribuzione dell'umidità nelle murature. Individuate le aree da ritenersi omogenee è quindi opportuno procedere alla misura del contenuto [8] d'acqua per campioni rappresentativi delle condizioni di imbibizione. Metodi termici consolidati permettono di ottenere tale mappatura, secondo procedure qualitative di IRT 1.

Una delle principali applicazioni dell'IRT è senz'altro la diagnosi dell'umidità muraria. Le anomalie termiche indicative della presenza di acqua nelle superfici indagate all'infrarosso termico si distinguono dalle zone non imbibite: a seconda delle condizioni ambientali

appaiono come aree più fredde, a causa dell'evaporazione superficiale. Invece a seguito di riscaldamento, a causa della maggiore inerzia termica dell'acqua contenuta nei materiali edili [9], possono apparire più calde durante la seconda fase di raffreddamento delle strutture. Nel primo caso il raffreddamento della superficie è determinato dall'elevato calore latente dovuto all'evaporazione in atto, quindi alla forte dissipazione di energia termica conseguente al passaggio di stato (da liquido a gassoso) dell'acqua contenuta in superficie. Il processo evaporativo è governato principalmente dall'Umidità Relativa dell'aria che lambisce la superficie, dalla sua Temperatura (T^a), oltre che dalla concentrazione di acqua contenuta nel materiale, dalle sue caratteristiche chimico-fisiche e dalla presenza di sali solubili. Il controllo delle condizioni termogravimetriche si dimostra pertanto indispensabile per ottenere una battuta termografica attendibile e per poter valutare correttamente i termogrammi. Infatti in presenza di elevata UR ambientale ogni processo evaporativo viene inibito e pertanto non è possibile ottenere un rilievo attendibile delle superfici umide mediante termovisione passiva poiché non si genera un raffreddamento della superficie sufficientemente significativo per essere univocamente correlato all'umidità e non piuttosto ad anomalie fisiche della superficie. Analogamente avviene per basse temperature. Dall'esperienza sul campo e dalle prove di laboratorio si sono rivelate come ottimali le seguenti condizioni climatiche: UR non superiore al 80%; ⁶ T non inferiore al $6-7^\circ\text{C}$; assenza di riscaldamento diretto. Il flusso inoltre può essere favorito da una leggera corrente d'aria che lambisce la superficie [12].

Progetto FOCUS

Formazione e Cultura per lo Sviluppo



Palazzo Moneta ad Inzago, infiltrazione di umidità dalla copertura. Il mosaico dei termogrammi è stato ripreso con condizioni ambientali di $T^{\circ}=26^{\circ}\text{C}$, e UR= 45%, in assenza di sollecitazione termica

Poiché la termografia all'infrarosso non è in grado di fornire neppure indicazioni qualitative sul contenuto d'acqua in profondità, a tutt'oggi risulta indispensabile integrare la mappatura ottenuta con metodi che permettano la determinazione quantitativa del contenuto d'acqua (prove gravimetriche, microonde, ecc.). La campionatura avviene su piccole aree, rappresentative però del regime termogrignometrico di superfici ben più estese, risultate alla stessa temperatura dalla termovisione. In molti casi il sistema più efficace consiste nell'integrazione della termografia all'infrarosso con le prove gravimetriche [10]. La distribuzione dell'umidità, ottenuta termograficamente, permette di ridurre notevolmente il numero dei prelievi, senza inficiare la validità della prova gravimetrica. Un esempio del metodo applicato è illustrato in fig. 9 e 10, in cui è inquadrato il prospetto principale del complesso di Corte Castiglioni a Mantova. Il caso presenta l'integrazione di prove gravimetriche e termografiche nella fase di indagini preliminari, ed un accurato studio sulle caratteristiche di assorbimento dei materiali in opera nella fase di diagnosi approfondita, che ha permesso di progettare un intervento di risanamento

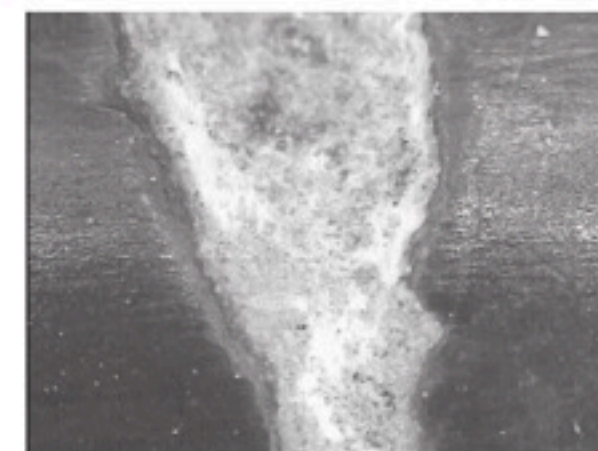
delle murature per fasi successive, modulate in funzione dei risultati del monitoraggio [11]. Particolarmente utile è la prova per l'identificazione dell'effettiva estensione di superfici interessate da umidità: l'analisi a vista, fondamentale per orientare in fase preliminare la scelta delle zone ove è più conveniente procedere ad accertamenti, permette di valutare l'estensione del degrado, mentre l'ispezione con IRT, in funzione dei gradienti termici misurati, delle caratteristiche igroscopiche dei materiali oggetto dell'indagine, fornisce anche indicazioni sulla zona di massima imbibizione della superficie, e quindi, indirettamente, sulle vie di adduzione dell'acqua. Ad esempio a Palazzo Moneta, Inzago (Mi), le abbondanti infiltrazioni di acqua meteorica dalla copertura hanno interessato le volte al piano terreno, lasciando evidenti segni di degrado sulle finiture. L'indagine mediante IRT ha permesso di localizzare, all'interno dell'area indicata in fig. 11, la zona in cui l'acqua si è accumulata, che si presenta con un gradiente delle temperature superficiali di circa 2°C .

Valutazione di sbilanci termici delle superfici e monitoraggio del microclima per l'analisi delle aree a rischio

La localizzazione di gradienti termici assume particolare importanza nel monitoraggio in primo luogo per l'individuazione precoce della presenza d'acqua, e in secondo luogo perché le superfici più fredde sono maggiormente a rischio di condensazione, nel caso di elevati tenori di UR ambientali e brusche diminuzioni di temperatura.

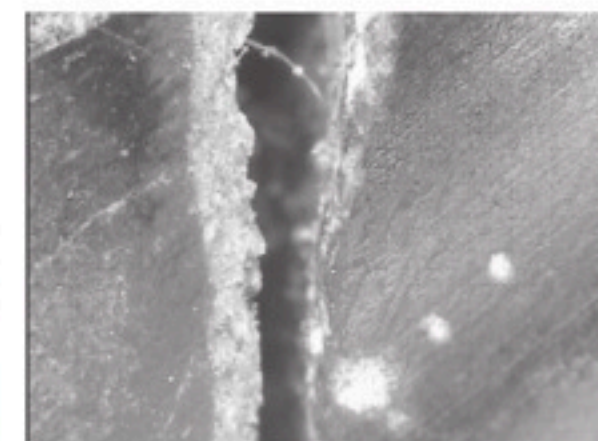
La mappatura delle temperature superficiali è perciò un buon metodo per il riconoscimento precoce delle aree a rischio, anche perché occorre considerare che la prova viene eseguita preferibilmente in modalità passiva, e pertanto può essere periodicamente ripetuta, senza alcun danno delle superfici oggetto dell'indagine, in modo veloce e su aree estese. La tecnica più usata è l'IRT.

Il monitoraggio termovisivo consente di registrare le variazioni del gradiente termico al mutare delle condizioni ambientali, e quindi di poter identificare gli interventi più mirati ed efficaci per contenere gli effetti dei fattori esterni di alterazione del microclima. Le immagini di seguito riportano un meccanismo di degrado regolato da fenomeni ancora in studio, ma

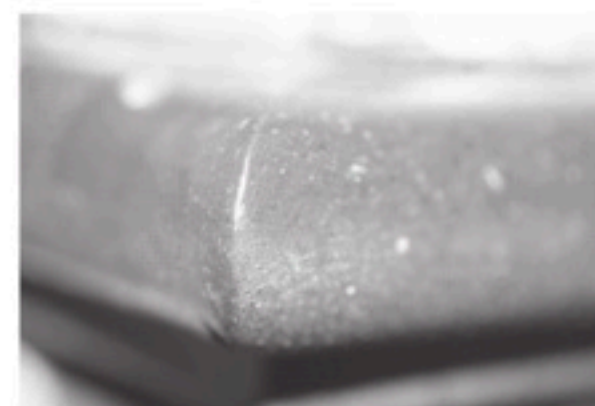


a causa dei processi di condensazione ed evaporazione si rileva la presenza di efflorescenze saline sui materiali più porosi, in particolare la malta di calce della stuccatura del materiale lapideo

che viene rilevato frequentemente in situ, durante le operazioni di restauro. Si notino gli effetti della



la stuccature della lacuna nel materiale lapideo è andata perduta a causa del degrado del materiale, che presenta infatti efflorescenze saline. Anche la superficie, trattata, del materiale lapideo è interessata da crescita di sali, nei punti in cui si è provocata una soluzione di continuità della pellicola più esterna



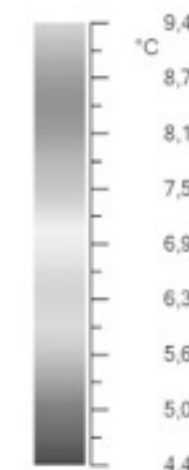
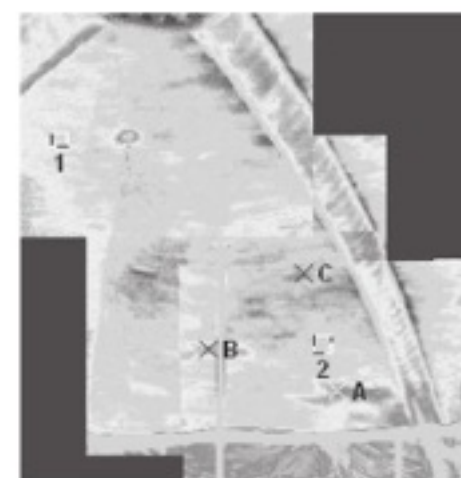
condensazione di ~~vapor~~ acqueo sulle superfici più fredde, come ad esempio i materiali lapidei in fig. 13. Fig. 13, chiesa di S. Tommaso a Premenugo di Settala, particolare dell'altare in marmi policromi, l'immagine è stata scattata nell'ottobre 2006, in una mattinata di nebbia, con condizioni ambientali: $T^a = 12^\circ\text{C}$, UR = 95%. Nel punto in cui siano state realizzate precedenti stuccature con malta di calce, l'acqua liquida scivola dalla superficie lapidea verso la stuccatura, e viene completamente assorbita dalla malta, provocando poi, in fase di evaporazione, la cristallizzazione di sali solubili precedentemente disciolti dall'acqua di condensazione (fig. 14). Il processo di condensazione/evaporazione possono avvenire anche più volte in una giornata, in condizioni climatiche di elevata umidità ambientale, provocando un elevato stress del materiale più poroso. In questa situazione si può giungere al completo degrado della malta (fig. 15). Estendendo la valutazione alle superfici in opera, è possibile asserire che i medesimi meccanismi di degrado interessano le zone in cui si verifichi la mancanza di omogeneità dei materiali, sia a causa della loro differente composizione e natura (materiali lapidei e malte), sia della loro diversa posa in opera e finitura superficiale, come studiato in una recente linea di ricerca [13]. Il precoce riconoscimento di queste zone a rischio è di grande interesse per la conservazione, soprattutto nei molti casi in cui non permangano condizioni microclimatiche favorevoli. Come già esposto in precedenti pubblicazioni, esiste una correlazione tra caratteristiche ottiche e di assorbimento d'acqua [14] e quindi il riconoscimento mediante analisi multi spettrali di eventuali discontinuità della superficie, dovute al trattamento finale, costituisce un elemento di valutazione della maggiore esposizione al rischio di degrado.

Il fenomeno del degrado differenziale tra materiali di ~~finitura differenti~~, o posti in opera con differenti ~~modalità~~, viene studiato anche in relazione alle caratteristiche morfologiche della struttura in cui si realizzano le condizioni microclimatiche che innescano in degrado.

Infatti, la geometria dei volumi che costituiscono lo spazio interno gioca un ruolo molto importante nella meccanica degli spostamenti delle masse d'aria, sottoposte a variazioni di temperatura e umidità indotte da ventilazione naturale, come dimostrato nel caso di studi presentato di seguito. Nella chiesa dell'Annunciata ad Abbiategrosso, l'integrazione del monitoraggio microclimatico, ottenuto mediante sonde fisse all'interno dell'edificio (estradosso e intradosso volta presbiteriale, abside) e all'esterno, prove psicrometriche e termografiche, ha permesso di determinare i meccanismi di distribuzione di UR e T^a all'interno del vano presbiteriale, e soprattutto a ridosso delle superfici degli affreschi e della volta, oggetto di un recentissimo restauro.



L'intonaco di recente posa, che integra quello cinquecentesco rimasto in opera, presenta alcune anomalie di colore che si sono venute a formare dopo la posa, autunno 2005



Punto	T^a °C	UR	T_a °C
A	8.4	0.92	16.9
B	7.4	0.92	16.9
C	5.1	0.92	16.9

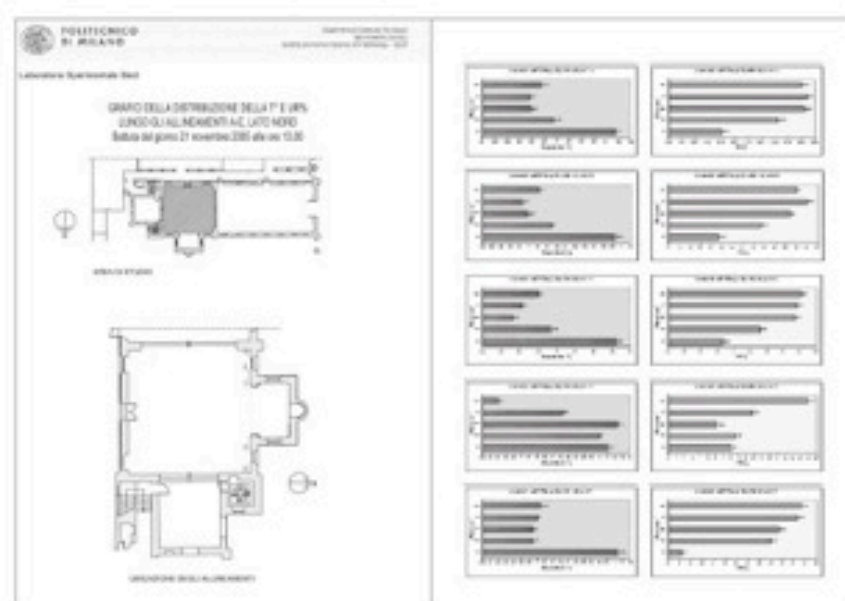
tabella delle temperature corrispondenti ai punti selezionati nei termogrammi

mosaico dei termogrammi della volta, $T^a = 17^\circ\text{C}$, UR = 68%.

Le misure effettuate nell'arco di un anno solare hanno inoltre permesso di stabilire i valori soglia per modificare le condizioni microclimatiche interne senza creare sbilanci dannosi per la conservazione delle superfici.

Le riprese termografiche sono state effettuate in modalità attiva. L'analisi termica ha messo in evidenza che le zone in cui la temperatura superficiale è inferiore, per morfologia della tessitura, possono essere considerate a rischio di condensazione nel caso di elevati tassi di umidità ambientale e temperature basse, condizioni risultate frequenti dal monitoraggio. In fig. 16 è possibile identificare che alcune zone, in cui si è intervenuto con velature e malte di restauro, abbiano rivelato caratteristiche igroscopiche differenti, in queste condizioni ambientali. In base agli esperimenti condotti in laboratorio, la stesura con utensili a lama, potrebbe essere una causa di compattazione superficiale dell'intonaco, e di conseguenza di maggiore densità degli strati più superficiali. In ogni caso, la soluzione che è stata suggerita alla direzione lavori, è stata di coibentare la struttura e di abbattere, gradualmente, l'UR ambientale.

grafici della distribuzione di UR e T° nel presbiterio, lungo profili verticali allineati a Nord, il 21 novembre 2005, alle ore 16



L'analisi dei risultati che si sono ottenuti mediante monitoraggio microclimatico e prove psicrometriche [2] ha messo in luce che la zona più problematica è risultata l'intradosso della volta, ove si registra costantemente un'umidità elevata sino ai livelli di saturazione. Nell'intradosso, l'aria più umida permane più a lungo rispetto alle altre zone dell'edificio: qui si generano sacche di aria più umida che ristagnano fino a 48-60 ore più a lungo rispetto alle altre zone in cui è avvenuto il monitoraggio e sussistono tutte le condizioni perché si generino fenomeni di condensazione sulle aree che risultano più fredde. Il periodo più critico è risultato quello autunnale/invernale, da novembre sino alla fine di gennaio, in cui l'UR media assume valori mai inferiori al 68%, più frequentemente compresi tra il 78 e il 90%. Le temperature subiscono un graduale ma sensibile aumento a partire da febbraio, ma è solo alla fine di aprile che i valori di UR rientrano finalmente entro quelli considerabili per la conservazione ottimale

delle superfici intonacate (50-60%). Anche il periodo primaverile presenta gli stessi problemi di squilibrio termo igrometrico, sia pur di minore entità a causa della temperatura ambientale più elevata. Infine, occorre ricordare che in molti casi le pareti più fredde sono le pavimentazioni [15]. Nel caso di mancanza di intercapedini o vespai, la temperatura del terreno influenza direttamente la temperatura superficiale dei rivestimenti. Per conduzione si verifica che anche la base delle pareti, a contatto con la pavimentazione, acquisisca una temperatura simile a quella del pavimento. Durante l'inverno, e soprattutto nelle stagioni intermedie, quando si verifica un elevato gradiente termico tra temperature superficiali ed ambientale, opposto a un elevato incremento dell'umidità ambientale, si assiste ricorrentemente alla condensazione di vapore acqueo e alla fase di evaporazione, alla ricristallizzazione dei sali. Pertanto si genera un degrado differenziale sulla pavimentazione e la base delle murature. Per distribuzione e localizzazione tale

danno potrebbe essere facilmente associato a umidità di risalita. Ovviamente gli interventi risolutivi sono molto diversi nel caso di umidità per condensazione e per risalita, e diventa pertanto cruciale la corretta diagnosi: l'integrazione di termografia all'infrarosso, per la determinazione dei gradienti termici superficiali, di prove gravimetriche e del monitoraggio ambientale consentono di discernere le differenti cause di degrado.

Conclusioni

Le attività diagnostiche presentate hanno il vantaggio di essere basate su tecniche consolidate che consentono un primo livello di rilascio dei dati con un impegno modesto di elaborazione. Le caratteristiche della fase analitica "preliminare" si adattano perfettamente in tutti i casi in cui occorra avere una prima definizione qualitativa dei fenomeni di degrado in atto, e pertanto offre le maggiori opportunità di indirizzare il progetto di riuso su soluzioni compatibili con l'effettiva morfologia e stato di conservazione del manufatto. Agli accertamenti preliminari possono far seguito analisi puntuali e quantitative, che permettano di approfondire la conoscenza della fabbrica e di giungere ad un progetto puntuale e mirato. Il carattere speditivo, sia pur mantenendo il rigore metodologico delle prove, ne amplia l'applicazione anche ai programmi di conservazione. Il set di prove che vertono sull'integrazione di tecniche di analisi multi spettrale e monitoraggio delle condizioni microclimatiche ed ambientali permette un uso versatile e predittivo, volto sostanzialmente all'identificazione delle superfici a rischio di degrado per sbilanci termigrometrici tra struttura e ambiente.

Note bibliografiche

- [1] S. Della Torre, "Manutenzione" o "Conservazione"? La sfida del passaggio dall'equilibrio al divenire, in *Ripensare alla manutenzione. Ricerche, progettazione, materiali, tecniche per la cura del costruito*, atti del XV convegno Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 29/6-2/7/99, a cura di G. Biscontin e G. Driussi, Venezia, Arcadia ricerche, 1999
- [2] S. Della Torre, E. Rosina, C. Faliva, M. Catalano, *Sperimentazione di tecniche analitiche integrate per la diagnostica finalizzata alla conservazione preventiva*, atti del IV Congresso Nazionale IGIC – Lo Scato dell'Arte – Siena, 28-30 Settembre 2006
- [3] E. Rosina, *La percezione oltre l'apparenza, l'architettura all'infrarosso*, A-Linea ed., Firenze, 2004
- [4] N. Ludwig, E. Rosina, *Heat Transfer Models for Detecting Deep Structures in Masonry*, 4th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, IROE, Firenze 1997
- [5] E. Rosina, E. Grinzato, E. Robison, *Mapping Masonry Bonding by Quantitative IR Thermography*, Thermosense XXIV, Orlando 2002
- [6] L. Di Bella, L. Lazzaroni, Villa Mirabello, in *Le Ville Mirabello e Mirabelino nel Parco Reale di Monza*, Silvana ed., Milano 2006
- [7] S. Della Torre, L. Lazzaroni, L. Di Bella, P. Gasparoli, A. Castiglioni, E. Rosina, M. Radzelli, H. W. Torres Reyna, *Villa Mirabello in Monza (It): Localize Historical Clues by IRT*, Atti del Conferenza Technart 2007, Lisbona 2007
- [8] UNI 11085 "Beni culturali. Materiali lapidei naturali ed artificiali. Determinazione del contenuto di acqua: Metodo ponderale"
- [9] N. Ludwig, E. Rosina, *Active and Passive thermography to detect moisture in building materials*, V AITA, International Workshop on "Advanced Infrared Technology and Applications", Venezia, 1999
- [10] G. Cruciani Fabozzi, E. Rosina, M. Valentini, *La valutazione del regime termogrignometrico della muratura: integrazione di termografia e prove ponderali*, con in Tema n 2, 1999
- [11] G. Cruciani-Fabozzi, D. Ferrieri, N. Ludwig, E. Rosina, R. Santori, S. Vannucci, *Nuovo approccio al progetto diagnostico dell'umidità nelle murature: casi esemplificativi in area lombarda*, Scienza e Beni Culturali XIV, Bressanone (BZ) 1998
- [12] E. Rosina, N. Ludwig e L. Risi, *Optimal Conditions to Detect Moisture in Ancient Buildings. Study Cases from Northern Italy*, Thermosense XX, Orlando USA 1998
- [13] E. Rosina, S. Della Torre, S. D'Ascola, S. Caglio, *Restauri a rischio: Microclima e differenze superficiali dei materiali in opera*, Conferenza Nazionale PND, Milano 2005
- [14] N. Ludwig, E. Rosina, *Restoration mortars at IRT: optical and hygroscopic properties of surfaces*,
- [15] V. Pracchi, E. Rosina, *Effetti della temperatura superficiale della pavimentazione sul degrado dei rivestimenti e sul*

microclima, XXIII Convegno internazionale Scienza e Beni Culturali, Bressanone 2006

Ringraziamenti

Si ringrazia per la collaborazione alle indagini Elke Di Flumeri e Hugo Wilfredo Torres Reyna

Elisabetta Rosina (1), Nicola Ludwig (2), Valeria Pracchi (1), Giuseppina Suardi (3)

(1) Politecnico di Milano, Dipartimento BEST, (2) Università degli Studi di Milano, IFGA, (3) Restauratrice

14. COMPATIBILITÀ E DURABILITÀ DEI RESTAURI DEGLI AFFRESCHI IN CONDIZIONI MICROCLIMATICHE SEVERE

The practice of frescoes restoration includes repointing/integration of lacks of plasters. Restorers use different tools and materials for the intervention. Recent researches [1-3] show that restoration plasters have different thermo-hygrometrical behaviours at low Temperature and high ambient Humidity rate.

The research starts from the observation in the field of the hygroscopic behaviour of different texture of mortars: textures obtained with hard tools (e.g. spatula, wooden float, trowel) have harder surfaces, more compacted, which facilitate the condensation of water vapour; soft tools finishing (sponge, sponge float) have a rough surface, which facilitate the absorption and evaporation of moisture. In case of contiguity between two different finishing, the edges of rougher surface (around more compact texture) show major damage. Despite of chemical compatibility of mortar compounds, the effects of change of state of water on surfaces cause a differentiated damage, starting from the edge of re-plastered areas. Durability of plasters set with different tools can be shorter than durability of homogeneous texture.

Early detection of risk areas, by use of Infrared Thermography (IRT) [2, 6] at transient conditions, is a great deal for preservation of historical buildings without a controlled HVAC system, and an advancement for the restoration techniques of precious surfaces. The paper reports a successful applications of the integration of IRT and microscopy in the recent restoration yard at Saint Mary by Saint Paul Church in Cantù [5, 10, 11]. Periodic inspections and microclimate monitoring allow to keep under control the initial damage on frescoes and to design the corrective actions inside the preservation plan.

KEYWORDS: IRT, surface roughness, plaster damage, videomicroscopy, condensation, restoration mortars, planned conservation

INTRODUZIONE

La mancanza di ventilazione e di riscaldamento adeguati, o l'uso improprio degli impianti, quando presenti, è spesso causa di degrado delle superfici interne, con effetti particolarmente vistosi sui rivestimenti. La precoce individuazione di elementi ed aree a rischio, dei fattori che hanno generato il degrado (o che lo possono provocare nel futuro, se non si verificano modifiche dello status quo), consente agli operatori di programmare le operazioni per la manutenzione preventiva. Le esperienze già consolidate nel campo della manutenzione programmata, hanno posto in evidenza che il controllo nel tempo dei punti critici permette l'intervento tempestivo e mirato, conseguendo un cospicuo risparmio economico e soprattutto garantendo l'effettiva conservazione dell'oggetto. Dalle ricerche già presentate [1-5], è emerso che la ricognizione periodica con tecniche di analisi multispettrale consente di individuare e controllare l'evolversi di incipienti fenomeni di degrado dovuti a non omogeneità della struttura. Le tecniche di ripresa nella banda spettrale del visibile e

dell'infrarosso termico si sono dimostrate molto utili per la localizzazione delle anomalie superficiali e subsuperficiali che generano processi di degrado in condizioni microclimatiche critiche [6]. In questo contributo si propone l'uso di tecniche di analisi dell'immagine per la valutazione delle zone con diverse "texture", spesso corrispondenti alle malte di restauro, in particolare delle zone attorno alle stuccature che sono risultate più soggette a condensazione e cristallizzazione salina.

Prove di laboratorio

Per studiare il meccanismo di degrado che si genera su malte di composizione simile, ma applicate con differenti modalità e in tempi diversi, è stata necessaria una fase di sperimentazione in laboratorio in cui sono state replicate condizioni climatiche e materiali fra i più diffusi osservati nei casi di studio.

Avendo appurato nei cantieri in studio che le differenze di Temperatura rilevate non sono imputabili a diversi componenti e porosità delle malte indagate, si è formulata l'ipotesi che siano dovute alla diversa lavorazione finale (e quindi levigatezza) delle superfici, legata all'utilizzo di vari attrezzi. Per verificare tale ipotesi, sono state realizzate alcune serie di provini, fabbricati con i materiali e gli utensili più comuni per la confezione e applicazione di malte di restauro, quali grassello di calce, carbonato di calcio, sabbia e polvere di marmo. Le prime prove effettuate su intonaci posati su

mattoni pieni hanno mostrato chiare differenze fra i vari tipi di finitura [3]. Tra le malte oggetto delle prove, quella composta da carbonato di calcio, grassello e sabbia ha risposto in modo marcatamente differente alla stimolazione termica in dipendenza del tipo di stesura. Controllando le proporzioni e le quantità di tutti i componenti, compresa l'acqua, la geometria e lo spessore dei campioni (1), sono state prodotte altre 3 serie di campioni, con i medesimi componenti (fig. 1) le cui superfici sono state rifinite con spatola, spugna, fratazzo di spugna e cazzuola.



Fig. 1. I quattro provini non mostrano molte differenze nella finitura ad esclusione della superficie su cui è stato usato il fratazzo (in alto a sinistra)

l'ambiente può costituire un fattore di rischio per la conservazione.

La ricerca, tuttora in corso, è stata inizialmente finalizzata all'identificazione dei fattori che determinano le diverse curve di assorbimento termico, e nella seconda fase a studiare le caratteristiche di igroscopicità in funzione della levigatezza e compattezza dello strato più superficiale. Data lo spessore limitato dello strato di interesse (inferiore al mm), dopo una prova preliminare e sulla base di studi già compiuti [7], si è escluso di poter ottenere risultati significativi applicando la procedura di prova UNI EN 1015-19: metodi per la determinazione della permeabilità al vapore delle malte da intonaco indurite.

Le procedure di prova sono state preliminarmente testate sui campioni della prima serie (le malte posate su cotto). Nelle successive serie di malte, la maggiore accuratezza di esecuzione ha fatto sì che ci fossero meno disomogeneità, e che quelle rimaste fossero meno pronunciate. Inoltre, la granulometria più fine dell'inerte, l'uso di contenitori di plastica (con bordi rigidi), il diametro dei petri inferiore alla dimensione di alcuni utensili (fratazzo, spatola e cazzuola) hanno permesso di ottenere provini più omogenei di quelli della prima serie. Come risultato [8], si è ottenuto che le

differenze misurate durante le prove fossero meno marcate di quelle rilevate nella prima serie, ma, indicative proprio delle diverse modalità di tecnica esecutiva.

Le prove eseguite sono state:

Termografia attiva: la tecnica si basa sulla ripresa di una serie di termogrammi all'infrarosso termico in fase di riscaldamento. La finalità della prova è valutare come l'assorbimento di calore, e quindi l'incremento di Temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) vari nel tempo in funzione delle caratteristiche della superficie. Il parametro che viene studiato è l'effusività termica ($\Delta T/t_{1/2}$), che esprime quantitativamente la caratteristica studiata. Il riscaldamento è stato ottenuto mediante lampada alogena a distanza ravvicinata dai campioni. Le sequenze sono state riprese con frequenza di 10 sec., per la durata di 5 minuti, in condizioni ambientali controllate (2).

Termografia passiva: la prova permette di misurare le caratteristiche di bagnabilità della superficie (assorbimento e diffusione di acqua liquida) mediante la ripresa di una sequenza termografica in assenza di stimolazioni termiche, e con condizioni ambientali ottimali per favorire il processo di evaporazione ($T^{\circ}\text{amb} = 20^{\circ}\text{C}$, UR = 50%). La frequenza di acquisizione è di 15 sec per una durata di 2 minuti. All'inizio della registrazione, viene depositata una goccia di acqua distillata sulla superficie del provino mediante un contagocce tarato per rilasciare in ogni prova esattamente la stessa quantità d'acqua e con la medesima pressione. La sequenza mostra la diffusione dell'acqua in funzione delle caratteristiche di bagnabilità della superficie e della sua compattezza (microporosità).

Prova di condensazione in cella di Peltier (3): la prova permette di osservare al microscopio (ESEM in modalità ambientale ingrandimenti 500-1000x) la condensazione del vapor acqueo sulle superfici in studio, e di misurare con estrema precisione le differenze morfologiche nella formazione delle gocce di acqua su ogni campione.

Misure del flusso evaporativo: la prova consiste nel rilevare la curva di desassorbimento di vapor acqueo al variare del contenuto ponderale mediante misure gravimetriche. Con questa tecnica è possibile valutare quantitativamente le differenze di comportamento nei fenomeni di scambio di acqua fra campione e aria al variare delle caratteristiche superficiali.

Ripresa con videomicroscopio di tre aree campione per ogni provino ha permesso di misurare il rapporto tra superficie dell'inerte esposto, la sua proiezione su di un piano parallelo a quello in cui giace, e l'area geometrica della parte inquadrata nella ripresa al microscopio (EGAA, Exposed Grains Average Area). La procedura, testata preliminarmente sui campioni di malta posata su cotto,

ha richiesto una maggiore accuratezza in questa seconda serie, poiché la superficie di tutti i campioni è risultata sostanzialmente molto più omogenea rispetto a quelli precedenti per la granulometria.

più fine dell'inerte impiegato

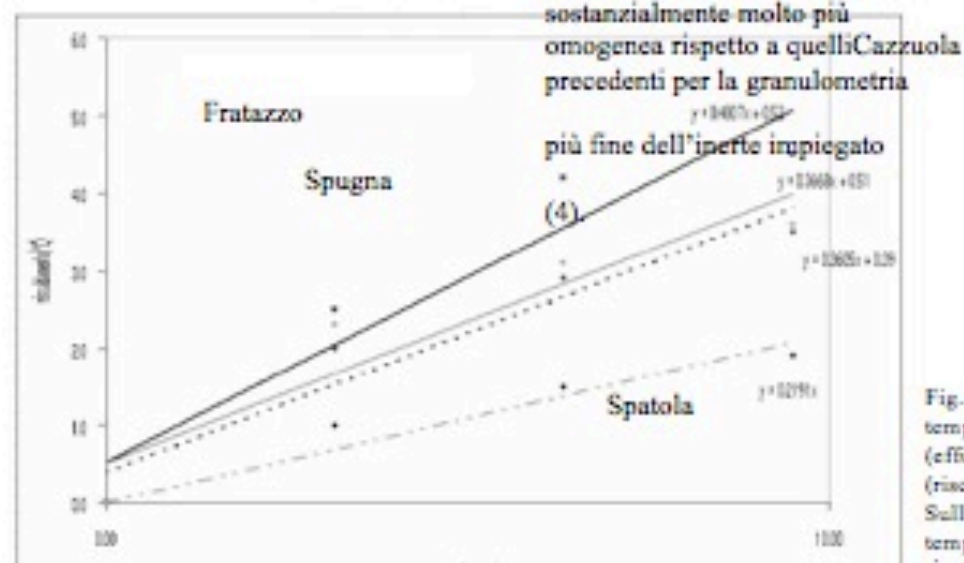


Fig. 2. Grafico dell'incremento di temperatura in funzione del tempo (effusività) sulla superficie dei provini (riscaldamento per irraggiamento). Sull'asse delle ascisse è indicato il tempo, sull'asse delle ordinate il riscaldamento.

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

1) Termografia attiva

Il grafico di fig. 2 mostra le curve di incremento della $T^{\circ}\text{C}$ in funzione della radice quadrata del tempo e l'interpolazione lineare relativa ai primi 80 secondi di riscaldamento (5). Si notano tre tipi di riscaldamento sostanzialmente differenti: i provini trattati con spatola, quelli con fratazzo e quelli trattati con cazzuola e spugna. L'incremento di $T^{\circ}\text{C}$ sulla superficie del provino finito a spatola risulta più lento e minore in valore assoluto rispetto a quello che si misura sulle superfici trattate con gli altri attrezzi. La finitura a spugna non sembra provocare effetti molto diversi dalla finitura a cazzuola per quanto riguarda il riscaldamento. Al contrario, la finitura con fratazzo subisce un incremento di $T^{\circ}\text{C}$ maggiore rispetto alle altre finiture. Questi dati confermano l'esperienza sul campo, e cioè che è possibile identificare minime variazioni di compattezza e levigatezza superficiale mediante tecniche di termografia attiva.

2) Termografia passiva

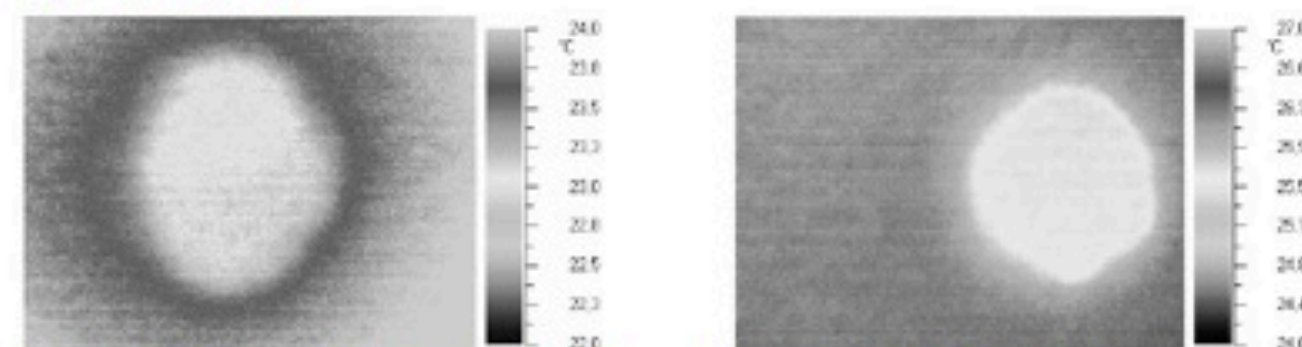


Fig. 3. Distribuzione di una goccia d'acqua sul provino rifinito a fratazzo (sinistra) e a spatola (destra) dopo 15 secondi dal contatto; UR 50%, $T^{\circ}\text{C}$ 20°C; emissività 0.85. Le immagini sono nella stessa scala metrica, le gocce di acqua distillata contengono la stessa quantità (20 ml).

La fig. 3 mostra le differenze di propagazione della goccia d'acqua nei campioni asciutti. La geometria della goccia assorbita differisce in funzione della superficie: nel caso del fratazzo la zona imbibita è più estesa, a dimostrazione di una efficace diffusione del fluido per la prevalenza di micropori distribuiti omogeneamente; comportamento opposto si rileva per la spatola e cazzuola (le lame metalliche provocano comportamenti simili), ove la zona imbibita ha un'estensione ridotta, causata dalla presenza di macropori che ostacolano la distribuzione uniforme dell'acqua, e modificano la forma circolare. Inoltre si noti l'"alone" che si forma attorno alla goccia sulla finitura trattata a fratazzo (sin.), e che sta ad indicare che esiste una zona in cui si osservano flussi evaporativi attorno alla goccia, che si espandono sulla superficie per un'estensione maggiore di quanto avviene per la goccia sulla finitura a spatola (dx). Si ipotizza la presenza di macropori che può essere stata causata dall'azione di abrasione meccanica della lama sulla superficie durante l'essiccazione (6).

3) Prova di assorbimento d'acqua superficiale mediante analisi al microscopio elettronico ESEM con cella Peltier

Una conferma dei risultati ottenuti con metodi termografici è data dalla microscopia ESEM. La procedura di prova è consistita nell'osservare con microscopio elettronico ESEM la superficie dei campioni in cella di Peltier, mentre le condizioni microclimatiche raggiungevano il 100% di UR e la Temperatura si avvicina allo 0°C . In tali condizioni comincia la condensazione delle gocce d'acqua

sulla superficie del provino. Attraverso la misura delle loro dimensioni è possibile ottenere informazioni sulle caratteristiche di permeabilità della superficie all'acqua. I risultati della prova hanno permesso di suddividere i campioni di malta in due gruppi:

- I campioni rifiniti con cazzuola e spatola, presentano caratteristiche di porosità superficiale tali da consentire la formazione e permanenza delle gocce d'acqua. Le dimensioni delle gocce sono comprese tra 20-50 μm , la forma è ben definita, circolare.
- I campioni rifiniti con spugna e fratazzo presentano caratteristiche di porosità superficiale tali da consentire la formazione di gocce d'acqua in maniera molto limitata, in pochi secondi (5-10) vengono assorbite dal materiale. Le dimensioni delle gocce sono di circa 5-10 μm .

La prova conferma che per finiture più lisce e compatte la permeabilità all'acqua liquida è minore rispetto alle finiture meno levigate, ottenute con spugne e utensili morbidi, in conformità a quanto sperimentato con termografia all'infrarosso con approccio passivo.



Fig. 4. Flusso evaporativo in funzione del contenuto d'acqua. Spugna (spu), spatola (spa2), fratazzo (frat) e cazzuola (caz). Condizioni controllate in camera climatica: UR 50%, temperatura 20°C. Sull'asse delle ascisse è riportato il contenuto d'acqua in percentuale del peso del provino, sull'asse delle ordinate il flusso evaporativo.

4) Calcolo del flusso evaporativo

Il grafico di fig. 4 mostra il flusso evaporativo in funzione del contenuto d'acqua (in peso percentuale). Le diverse fasi dell'evaporazione sono ben distinguibili sui quattro provini: in quelli trattati a spugna, spatola e cazzuola si registrano valori più elevati del flusso evaporativo, e si mantengono costanti per contenuti d'acqua superiori al 10%.

La finitura a fratazzo di spugna differisce perché inizialmente si registrano valori molto alti (in questa fase, la maggior parte del contenuto d'acqua evapora), di conseguenza, nella fase successiva del processo, il valore di flusso è minore di quelli che si misurano sulle altre finiture. Come la termografia all'infrarosso con approccio passivo ha dimostrato, la finitura a fratazzo genera un comportamento igroscopico molto differente dalle altre.

5) Microscopia

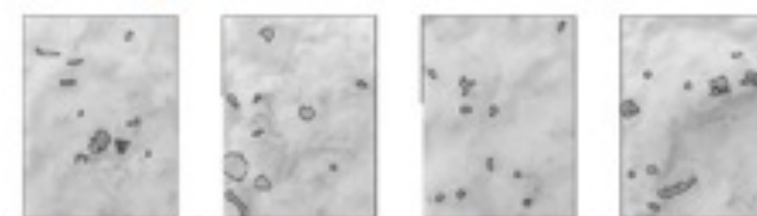


Fig. 5. Da sinistra: finitura a cazzuola, fratazzo, spatola, spugna; identificazione delle aree per il calcolo di EGAA.

La figura 5 mostra superfici molto simili, nonostante il parametro EGAA sia un poco differente in ogni finitura. L'omogeneità della superficie permette di escludere l'influenza dell'assorbanza spettrale sui risultati della IRT. Se si confrontano le malte con l'assorbanza, la procedura di IRT presentata è adatta a distinguere le differenze di densità degli strati più superficiali, e ciò significa la granulometria, sporgenza e colore dei grani di inerte. Nella procedura di prova presentata, la videomicroscopia consente di documentare l'omogeneità della superficie e costituisce un'utilissima validazione dei risultati della IRT. Il parametro EGAA non sembra influire né sull'evaporazione né sul riscaldamento per irraggiamento, durante la IRT attiva.

La tabella di fig. 6 raccoglie i risultati delle prove eseguite sui campioni, e consente di correlarne comparativamente i dati: il campione di malta stesa a spatola risulta il più compatto superficialmente come indicato dalla maggiore velocità di propagazione del calore, la pressione esercitata dalla lama durante l'applicazione comprime il materiale, riducendo il volume dei pori. Su questa superficie si osserva la più duratura e stabile condensazione del vapor acqueo a causa della condensazione capillare. Il riscaldamento del provino rifinito a spugna mostra un andamento parzialmente influenzato dalla diversa riflettanza spettrale della superficie, resa più ruvida. I risultati del flusso evaporativo dei provini rifiniti a spugna, fratazzo e spatola sono in buon accordo fra loro e mostrano il comportamento tipico di materiali durante il desassorbimento di acqua liquida; la stesura a cazzuola invece presenta l'andamento meno regolare che è significativa di una maggior differenziazione tra la forma dei pori superficiali e quelli degli strati sottostanti.

STRUMENTO	Pressione esercitata sull'intonaco	TERMOGRAFIA Attiva	EGAA	CONDENSAZIONE	FLUSSO EVAPORATIVO
Spatola	1 ^a	Più denso	0.11	Alta	Regolare
Cazzuola	2 ^a	Intermedio	0.14	Media	Diminuisce rapidamente
Fratazzo	3 ^a	Meno denso	0.29	Poca o nulla	Regolare
Spugna	4 ^a	Intermedio	0.31	Poca o nulla	Regolare
N O T E	Pressione ipotizzata di applicazione della malta con lo strumento	I dati di incremento di T°C sono indicativi della capacità di condurre il calore: poiché il calore specifico è identico (il materiale è lo stesso) si può parlare di densità.			Un'evaporazione regolare indica che i pori si svuotano con regolarità, a flusso costante. Un flusso evaporativo con andamento differenziato indica un cambiamento della forma dei pori fra quelli di superficie e quelli interni.

Fig. 6. Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti nella ricerca.

IL CASO APPLICATIVO DI SANTA MARIA PRESSO SAN PAOLO A CANTÙ

Era già in corso la sperimentazione ora illustrata quando, nel 2004, venne terminato il restauro dell'oratorio di Santa Maria presso San Paolo a Cantù [9, 10]. Motivazioni di ordine economico avevano obbligato a considerare come prioritario l'intervento sulle superfici affrescate, sui fronti esterni e sulle coperture, demandando ad un secondo lotto di lavori, ad oggi non realizzato, il trattamento del microclima e l'illuminazione (per informazioni più estese si rimanda al contributo di Valeria Pracchi, "Il follow up dei propri cantieri di restauro", in questo volume).

Per questa ragione sono state previste ispezioni periodiche basate sull'analisi visiva, fotografia e controllo microclimatico al fine di valutare l'insorgere di eventuali patologie nelle zone già individuate come più a rischio, sulla base della conoscenza preliminare legata ai controlli intercorsi tra il 1998 e il 2003, e derivante dall'esperienza del cantiere stesso [11]: in particolare preoccupavano le anomalie termografiche di alcune superfici localizzate durante e subito dopo i restauri. A scopo esemplificativo viene riportato lo stato di fatto della porzione di affresco raffigurante San Domenico, in controfacciata (lato ovest). Le immagini sono state scattate subito dopo un periodo di pioggia intensa, nell'aprile 2008, e permettono di rilevare la cristallizzazione di sali solubili sulla superficie pittorica. Nel 1999, durante il consolidamento d'urgenza finanziato dalla Soprintendenza, si effettuò in questa stessa zona, che si presentava già allora interessata da fenomeni di solfatazione, un trattamento desolfatante (7). La prova serviva a valutare l'efficacia del trattamento, ed eventualmente estenderlo ad altre superfici interessate dal fenomeno, nel restauro complessivo del ciclo pittorico che sarebbe seguito. Nel 2004, ad apertura del cantiere, si constatò che la zona manifestava nuovamente le problematiche già illustrate, perciò si intervenne per due volte nell'arco di pochi mesi, con impacchi assorbenti per l'estrazione di sali solubili. Ciò nonostante il fenomeno ha continuato a manifestarsi anche dopo il restauro.

Le immagini, scattate durante i controlli recenti con obiettivo macro e videomicroscopio permettono di documentare efficacemente la rapida ed intensa cristallizzazione dei sali sulla superficie nel periodo primaverile. Il degrado iniziale delle superfici si manifesta in modo differente sull'affresco e sulla malta di restauro: le efflorescenze saline interessano soprattutto il primo: nonostante la crescita dei sali la superficie rimane compatta e aderente ma i colori risultano opacizzati da un velo biancastro. La malta di restauro adiacente (8), che è stata mantenuta sottosquadro, nella zona di contatto con l'affresco risulta già decoesa e sfarinante (fig. 7, 8), mentre a qualche centimetro di distanza dal bordo mantiene inalterate le sue caratteristiche meccaniche.

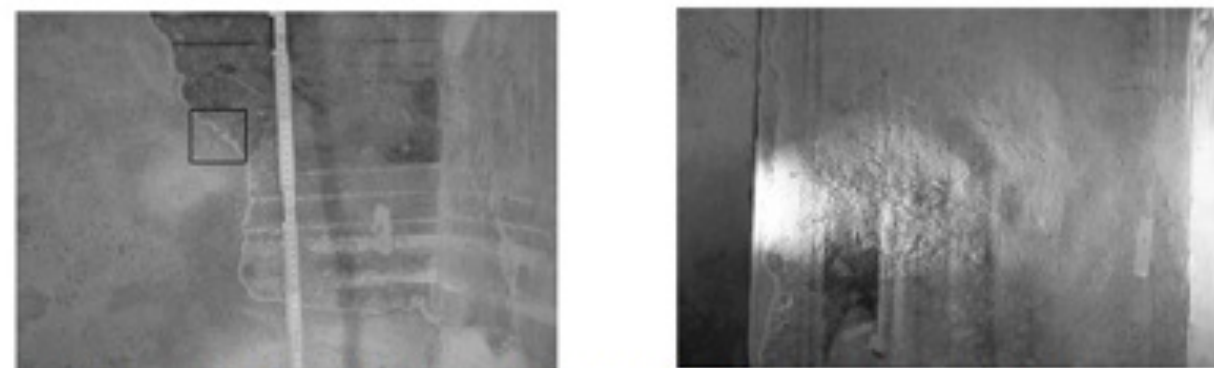
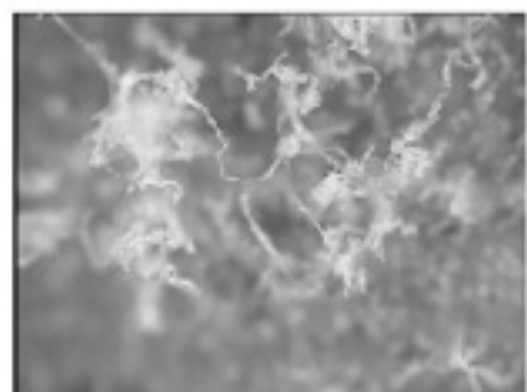


Fig. 7, 8. Controfacciata, affresco di San Domenico, degrado delle malte e localizzazione delle efflorescenze saline a luce radente. In fig. 7, nel riquadro, si localizza la zona di ripresa con videomicroscopio

L'analisi del contenuto d'acqua in alcuni microprelievi appena sotto la zona maggiormente degradata (che si trova a circa 1 m dal pavimento) permette di escludere la presenza di umidità di risalita in questa zona. Il controllo nel punto in cui in passato si ebbero infiltrazioni permette invece di accertarne il perdurare al piede della muratura dell'abside. I risultati del monitoraggio microclimatico indicano che nella stagione autunnale ed invernale del 2007 i valori di UR ambientali si sono mantenuti frequentemente entro il 65-70%, e la T°C non è scesa sotto i 2°C. Dalla letteratura scientifica [12-13, 15-16] si evince che la presenza di sali solubili, e soprattutto la loro miscela, non solo influisce sull'igroscopicità dei materiali di finitura, ma anche sui fenomeni di condensazione superficiale e di evaporazione che avvengono in concomitanza delle variazioni di UR ambientale.



Fig. 9, dettaglio della fig. 7 videomicroscopio da cantiere, (ingr. 50x); fig. 10, efflorescenze saline, videomicroscopio da cantiere, (ingr. 200 x)



Pertanto, il controllo nel tempo del degrado che la superficie subisce in funzione delle variazioni microclimatiche permette di avanzare ipotesi per una più opportuna conservazione (anche se non si può intervenire direttamente sulle cause che generano il degrado). Abbiamo inoltre ritenuto che, a differenza di quanto registrato nel piano di conservazione programmata, che prevedeva la ripetizione di analitiche paragonabili a quelle già impiegate nel passato, le caratteristiche degli accertamenti che si proseguono debbano essere differenti [17, 18]. Si tratta infatti di indagini che integrano la raccolta di informazioni in situ, da ottenersi con tecniche speditive, mediante prove più specifiche, basate sull'analisi approfondita di alcuni parametri quali la presenza di sali solubili ed il loro incremento al variare delle condizioni ambientali, basate sul monitoraggio delle variazioni della Temperatura superficiale in funzione delle variazioni microclimatiche, oltre che sull'identificazione degli sbilanci termici delle superfici. Rimangono invece invariate le esigenze di mettere in campo tecniche non invasive, poco costose per la possibilità di applicazione con economie di scala, che non richiedano la continua presenza dell'operatore, che producano dati affidabili e che consentano un'elaborazione rapida per poter rilasciare un primo livello di informazioni. Dal punto di vista del restauratore si può affermare che, in presenza di cause di degrado sconosciute di origine ambientale, oltre a monitorare il caso, si possono prevedere azioni minime per evitare che situazioni critiche comportino l'estendersi delle problematiche su superfici sane (ad esempio sarebbe efficace e di nessun costo un corretto arieggiamento degli ambienti, se fosse però effettuato secondo parametri noti e dunque non affidato solo al buon senso ed alla memoria di anziani parroci) seguite da periodici contenuti e puntuali interventi di rimozione dei sali solubili con eventuali fissaggi localizzati della pellicola pittorica in corrispondenza delle zone critiche, con un calendario degli interventi, del resto in ottemperanza a quanto previsto dal piano.

CONCLUSIONI

La sperimentazione da tempo avviata, anche in virtù di conferme e di controlli ancora in corso, resi possibili dall'analisi di più casi studio, tra i quali quello riportato, consente di ipotizzare che l'incontro tra malte preesistenti e di nuova fattura, o comunque ottenute con procedimenti differenti costituisca un punto sensibile da tenere sotto stretta osservazione. In tal senso il piano di conservazione programmata potrebbe registrare fin da subito l'informazione e prevedere controlli accurati in zone note (nell'ipotesi di monitoraggio post restauro), o individuabili tramite indagini termografiche. Esse hanno infatti consentito di delimitare le aree di intervento e di ripresa degli strati dovuti agli interventi susseguirsi nel tempo, con metodi complementari all'analisi a vista da distanza ravvicinata. La termografia si è dimostrata inoltre un mezzo utile per misurare le variazioni della struttura dello strato più superficiale della finitura, dovute all'uso di attrezzi diversi: gli approcci attivo e passivo permettono di evidenziare fattori differenti.

La ricerca avviata sulla durabilità e compatibilità delle malte di restauro permette dunque di identificare le zone maggiormente a rischio, che diventano aree di riferimento per la valutazione sia del procedere del degrado, sia, dove possibile, per la messa in campo di provvedimenti per la sua riduzione.

NOTE

- (1) I contenitori hanno diametro pari a 9.5 cm di e spessore di 6 mm.
- (2) Per valutare il coefficiente di assorbimento dell'energia, sono state effettuate misure di riflettanza spettrale nella banda 400-1100 nm su 5 aree campione di ogni provino; poiché lo spettro è risultato sostanzialmente piatto, si è attribuito un valore medio di riflettanza come parametro significativo per valutare gli effetti di riscaldamento differenziale dovuti a questo fattore.
- (3) La prova è stata svolta presso il laboratorio C.S.G. Palladio di Vicenza, nell'ambito della tesi di dottorato di Simona D'Ascola, "Le problematiche connesse all'umidità nei sistemi edilizi storici: verso un protocollo per l'ottimizzazione delle indagini sperimentali in riferimento all'innovazione del processo"; relatore prof. S. Della Torre, XIX ciclo dottorato di ricerca in Sistemi e processi edilizi, Politecnico di Milano.
- (4) Per ogni immagine ripresa è stato calcolato l'area della proiezione della parte del granello di inerte non rivestito dal legante sul piano che interseca il fuoco dell'ottica del microscopio, parallelo alla superficie da analizzare. Poiché il piano viene mantenuto uguale per ogni immagine, le medie delle aree che si calcolano con il procedimento descritto sono confrontabili. In questo modo, gli autori hanno correlato la scabrosità della superficie con un parametro quantitativo, il EGAA (Exposed Grains Average Area). Maggiore è il valore di EGAA, maggiore è la scabrosità, ruvidezza della superficie. La sporgenza dei granelli dell'inerte determina le caratteristiche ottiche della superficie, e, di conseguenza, le proprietà del bilancio di irraggiamento della superficie, che influenza direttamente il comportamento termico della superficie del provino. Un criterio simile, per la parametrizzazione delle disomogenità superficiali, è stato utilizzato in precedenti esperienze [14].
- (5) Si osserva l'aumento della Temperatura solo nei primi 80 secondi perché si stanno analizzando gli effetti del trasferimento di calore solo negli strati più esterni della finitura (pochi mm di spessore), in cui lo scambio con l'ambiente è molto rapido.
- (6) Gli strumenti a lama metallica, usati di taglio o di piatto durante la primissima fase di essiccamento del provino, rimuovono lo strato di legante che riveste anche le parti più sporgenti dell'inerte e quindi generano la presenza di piccole cavità.
- (7) Gli impacchi desolfatanti sono stati realizzati con una soluzione di resina a scambio ionico mantenuta a contatto mediante polpa di carta, avendo interposto lo strato d'intervento costituito da carta giapponese, seguiti da successiva rimozione dei residui della pulitura con acqua demineralizzata.
- (8) Le malte di restauro sono state applicate in due strati: un sottofondo preparatorio costituito da tre parti di sabbia vagliata e una parte di calce idrata ventilata tipo dolomia in polvere; una finitura "neutra" costituita da quattro parti di aggregati (sabbia vagliata, polvere di marmo di Zandobbio, sabbia di Siena, una parte e

mezzo di calce idrata ventilata tipo dolomia in polvere. La finitura neutra è stato steso a cazzuola e successivamente rifinita a spugna.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Della Torre et alii, La conservazione programmata del patrimonio storico architettonico, linee guida per il piano di manutenzione e consuntivo scientifico, Guerini ass. ed, Milano 2003
- [2] E. Rosina, N. Avdelidis, A. Moropoulou, S. Della Torre, V. Pracchi, G. Suardi, IRT Monitoring in Planned Preservation of Built Cultural Heritage, 16th World Conference on NonDestructive Testing, Montreal 2004
- [3] E. Rosina, S. Della Torre, S. D'Ascola, S. Caglio, Restauri a Rischio, microclima e differenze superficiali dei materiali in opera, 11 Conferenza Nazionale PND, Milano, ed. AIPND, Brescia ottobre 2005
- [4] E. Rosina, N. Ludwig, V. Redaelli, IRT for Mapping Restoration Plasters by Convective Heating, 8th International Conference on Non Destructive Investigations and Microanalysis for Diagnostics and Conservation of the Cultural and environmental Heritage, Lecce 2005
- [5] S. Della Torre, V. Pracchi, E. Rosina, G. Suardi, L'intervento di conservazione all'oratorio di santa Maria presso san Paolo a Cantù, XXI Convegno internazionale Scienza e Beni Culturali, Bressanone 2005, Arcadia ricerche ed., Padova 2005
- [6] S. Della Torre, E. Rosina, V. Pracchi, G. Suardi, N. Ludwig, V. Redaelli, A. Sansonetti, R. Negrotti, Le indagini multispettrali per il riconoscimento telemetrico degli interventi di restauro nelle pitture murali, XXI Convegno internazionale Scienza e Beni Culturali, Bressanone 2005, Arcadia ricerche ed., Padova 2005
- [7] A. Jornet, A. Somai, A. Romer, Lime mortar for renders there a relationship between finishing technique and properties? Preliminary results, International Workshop repair mortars for historic masonry, Delft University of technology, January 2005, Delft (Netherlands)
- [8] N. Ludwig, E. Rosina, Restoration mortars at IRT: optical and hygroscopic properties of surfaces, 8th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Giugno 2006, Padova, ed CNR-ITC Padova
- [9] V. Pracchi, Il progetto di conservazione: finalità e requisiti, in Il restauro della Madonnina di S. Paolo, a cura di S. Della Torre, Cantù 2005
- [10] S. Della Torre, a cura di, Il restauro della Madonnina di S. Paolo, Cantù 2005
- [11] E. Rosina, Indagini diagnostiche, in Il restauro della Madonnina di S. Paolo, cit.
- [12] B. J. Colston, D. S. Watt, H. L. Munro, Environmentally-induced stone decay: the cumulative effects of crystallization-hydration cycles on a Lincolnshire oolite limestone, Journal of cultural heritage 4, Elsevier 2001
- [13] A. Sawdy, C. Price, Salt damage at Cleeve Abbey, England. Seasonal variability of salt distribution and implications for sampling strategies, part I and II, Journal of cultural heritage 5 and 6, Elsevier 2005
- [14] E. Zendri, G. Biscontin, P. Kosmidis, Effects of condensed water on limestone surfaces in a marine environment, Journal of cultural heritage 4, Elsevier 2001
- [15] S. Sanchez-Moral, L. Luque, S. Cuezval, V. Saler, D. Benevante, L. Laiz, J.M. Gonzales, S. Saiz-Jimenez, Deterioration of building materials in Roman catacombs: the influence of visitors, Science of the Total Environment n 349, issue 1-3, 15 October 2005
- [16] C. Colombo, S. Montonato, R. Negrotti, V. Pracchi, M. Valentini, I sali solubili negli edifici storici: alla ricerca di un valore di soglia, in Atti del IV Congresso Nazionale IGHC, Lo stato dell'arte, Siena 2006, Nardini Ed., Firenze 2006.
- [17] S. Della Torre, E. Rosina, M. Catalano, C. Faliva, G. Suardi, A. Sansonetti, L. Toniolo, G. Valentini, R. Cubeddu, D. Comelli, Early detection and monitoring procedures by means of multispectral image analysis, 8th International Conference on Non Destructive Investigations and Microanalysis for Diagnostics and Conservation of the Cultural and environmental Heritage, Lecce 2005
- [18] S. Della Torre, E. Rosina, C. Faliva, M. Catalano, Sperimentazione di tecniche analitiche integrate per la diagnostica finalizzata alla conservazione preventiva, in Atti del IV Congresso Nazionale IGHC, Lo stato dell'Arte, Siena 2006, Nardini Ed. Firenze 2006

ANNEX 6: RESUM DEL CONTINGUT DELS ARTICLES ELISABETTA ROSINA

ANNEX 6

RESUM DEL CONTINGUT DELS ARTICLES ELISABETTA ROSINA

Contingut

1. "NEW IRT PROCEDURES FOR THE EVALUATION OF STONE'S WATER EXCHANGE CHARACTERISTICS IN BUILDING "
2. "IRT MONITORING IN PLANNED PRESERVATION OF BUILT CULTURAL HERITAGE"
3. "LOCALIZING HISTORICAL CLUES USING IRT AND PETROGRAPHIC ANALYSES AT VILLA MIRABELLO, MONZA (ITALY)*"
4. "KARST SOIL AND RISING DAMP IN SASSARI: GUIDE LINES FOR RESTORATION OF CANOPOLENO COMPLEX"
5. "EFFETTI DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE DELLA PAVIMENTAZIONE SUL DEGRADO DEI RIVESTIMENTI E SUL MICROCLIMA"
6. "DIAGNOSTICS FOR THE PRESERVATION PLANS OF DIFFUSED HISTORICAL HERITAGE"
7. "TEXTILE SHELTERS FOR ARCHAEOLOGICAL AREAS: A CHANGE IN THE PRESERVATION OF CULTURAL HERITAGE"
8. "SPERIMENTAZIONE DI TECNICHE ANALITICHE INTEGRATE PER LA DIAGNOSTICA FINALIZZATA ALLA CONSERVAZIONE PREVENTIVA"
9. "UN CICLO DEL CINQUECENTO O UN AMBIENTE DELL'OTTOCENTO? INDAGINI PROPEDEUTICHE AL RESTAURO DEL SALONE DI ULISSE NELLA PALAZZO DELLA PROVINCIA DI BERGAMO"
10. "INDAGINI SULLE PROBLEMATICHE CONSERVATIVE LEGATE ALL'UMIDITA"
11. "RESTAURI A RISCHIO: MICROCLIMA E DIFFERENZE SUPERFICIALI DEI MATERIALI IN OPERA"

12. "LA PREVENZIONE DEL DANNO E PRESTAZIONI DEI TRATTAMENTI CIBSERVATIVI: METODI DIAGNOSTICI INNOVATIVI PER APPLICAZIONI IN SITU"

13. "METODI DI ANALISI PRELIMINARE DEL DEGRADO PER I BENI CULTURALI"

14. "COMPATIBILITÀ E DURABILITÀ DEI RESTAURI DEGLI AFFRESCHI IN CONDIZIONI MICROCLIMATICHE SEVERE"

A continuació s'exposa un breu de resum d'alguns articles facilitats per Elisabetta Rosina, i que m'han ajudat a documentar-me sobre aquesta tècnica. Com s'ha pogut observar en l'annex anterior, els articles es troben realitzats en anglès o en italià, per aquest motiu ha estat necessària una traducció dels mateixos en català:

1. "NEW IRT PROCEDURES FOR THE EVALUATION OF STONE'S WATER EXCHANGE CHARACTERISTICS IN BUILDING "

"PROCEDIMENTS IRT NOUS PER L'AVALUACIÓ DE LES CARACTERÍSTIQUES DE LA DIFUSIÓ DE L'AIGUA EN LA PEDRA EN ELS EDIFICIS"

Aquest article ens mostra l'aplicació de dues tècniques innovadores. Uns mètodes IRT (de Termografia infraroja), per mesurar la difusió de l'aigua en els materials. El laboratori ha comprovat aquesta tècnica en 30 tipus de materials diferents (marbre, calcària, etc.), que mostren una relació entre porositat, flux d'evaporació, capil·laritat i fenòmens de difusió, tant en fase líquida com en fase de vapor, dins de la microestructura de les mostres de pedra.

Aquestes tècniques permeten mesurar diferents característiques de la capa exterior dels materials de construcció de pedra. Els procediments termogràfics eren innovadors, i la seva validesa es va demostrar amb el creuament de dades en procediments estandarditzats. En particular, es va justificar la seva importància a partir de les proves de pes del laboratori produïdes pels resultats de validació de dades termogràfiques, i com a resultat de les proves més adequades per avaluar quantitativament la capacitat d'absorció i evaporació d'aigua líquida.

2. "IRT MONITORING IN PLANNED PRESERVATION OF BUILT CULTURAL HERITAGE"

"MONITOREIG IRT EN LA PLANIFICACIÓ DE LA PRESERVACIÓ DEL PATRIMONI CULTURAL CONSTRUÏT "

Aquest article fa referència al desenvolupament de la IRT (Termografia infraroja), a partir d'uns procediments pel seguiment de les intervencions en restauració de les superfícies dels edificis antics (és a dir, l'aplicació de pel·lícules protectores repel·lents a l'aigua i la restauració de la delaminació del guix), la vigilància de les zones de risc (amb risc es refereix a infiltracions, ponts tèrmics, finestres, etc.). La possibilitat d'incloure la Termografia infraroja entre les tècniques de control per a la conservació prevista, dependrà de la fiabilitat dels procediments en el camp i el seu baix cost.

3. "LOCALIZING HISTORICAL CLUES USING IRT AND PETROGRAPHIC ANALYSES AT VILLA MIRABELLO, MONZA (ITALY)"

"LOCALITZAR INDICIS HISTÒRICS AMB ANÀLISIS IRT I PETROGRÀFIC EN VILLA MIRABELLO,

MONZA (ITALIA)"

Aquest article tracta sobre la reconstrucció de Villa Mirabello, la qual es va iniciar a l'any 1666. Va ser construït per Gerolamo Quadrio, i es tracta d'un projecte reformat i ampliat referent a una petita casa de camp.

La remodelació va consistir en la demolició selectiva de les parts de l'estructura, la reutilització de part de la maçoneria com el nucli del nou edifici, i el reforç del picapedreratge retintut per la inclusió de pedra "ceppo". L'objectiu de Quadrio va ser la creació d'una casa elegant.

El cardenal Angelo Durini va fer una petita modificació important al segle XVIII, i altres canvis amb menor importància es van realitzar al segle XIX. Aquestes últimes modificacions no alteraven el pla, que consistia en canviar la distribució de les habitacions i la decoració de màscares i l'acabat. Després de 20 anys, Villa Mirabello està a punt de tornar a ser restaurat. Arquitectes a càrrec, van ordenar un diagnòstic per avaluar els danys i estudiar l'evolució històrica de l'edifici. S'integra la termografia d'infrarojos (IRT), per a l'obtenció de dades importants.

Active IRT proporcionen informació útil per a l'avaluació estructural (com la ubicació dels arcs, xemeneies, diferents gruixos de paret, elements de fusta, buits, bigues, etc.) i per a l'avaluació crac patró. Aquesta informació es dirigeix a professionals del disseny que treballen en aquest projecte de conservació, i ajuda a definir els costos de la intervenció.

4. "KARST SOIL AND RISING DAMP IN SASSARI: GUIDE LINES FOR RESTORATION OF CANOPOLENO COMPLEX"

"TERRA KARST I HUMITAT ASCENDENT EN SASSARI: DIRECTRIUS PER A LA RESTAURACIÓ DEL COMPLEX CANOPOLENOS".

Aquest article tracta sobre la construcció de Canopoleno, la qual es va manifestar entre el segle XVI i principis del segle XVII: en primer lloc va ser "jesuïta Casa professo" (finalitzat el 1611), i més tard es va convertir en un dels quatre llocs d'origen de l'Ordre. Finalment, es va reutilitzar com a nou lloc de la Universitat (Col·legi Nou). Entre els segles XVIII i XIX es va produir una modificació important, sobretot a l'interior de l'edifici, a causa del canvi d'usos (seminari, la universitat, l'escola secundària).

La documentació de l'arxiu mostra que des del principi, l'augment de la humitat era un tema recurrent, a causa de la dolenta qualitat de la pedra local (anomenada "pietra spugna", pedra d'esponja) i la morfologia geològica local.

El diagnòstic es va centrar en: 1) Una inspecció preliminar amb termografia d'infrarojos (IRT), que va permetre obtenir dades de les zones més fredes del mapa de la majoria de les superfícies deteriorades (planta baixa i soterrani, interiors i exteriors). 2) Dins d'aquestes zones, es van prendre mostres per mesurar el contingut d'aigua, en alçades diferents (al llarg de línies verticals) i les distàncies de la superfície de la maçoneria (d'acord amb UNI 11085 "Beni Culturali materialitzar lapidei naturalitat ed artificiali Determinazione del contenuto di acqua: .. Mètode ponderal "). D'altra banda, un nou mètode

de control es va aplicar: El mètode de punts fixos.

5. “EFFETI DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE DELLA PAVIMENTAZIONE SUL DEGRADO DEI RIVESTIMENTI E SUL MICROCLIMA”

“EFECTES DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SÒL EN LA DECADÈNCIA DELS REVESTIMENTS I EL MICROCLIMA”

Avaluació del desequilibri tèrmic de la superfície. Cal tenir en compte les variacions climàtiques diàries i estacionals, per la seva afecció sobre el microclima a l'interior de l'edifici. La vigilància és la millor tècnica per mesurar aquestes variacions i els seus efectes sobre les estructures.

Descriu el paper dels procediments de prova per a la verificació tèrmica de les superfícies, i l'avaluació de la situació real de risc dels danys.

6. “DIAGNOSTICS FOR THE PRESERVATION PLANS OF DIFFUSED HISTORICAL HERITAGE”

“DIAGNÒSTIC DELS PLANS DE CONSERVACIÓ DE LA DIFUSIÓ DEL PATRIMONI HISTÒRIC”

El següent article exposa que:

El recent codi del Patrimoni Cultural (2004) defineix la conservació, com un procés planificat de llarga durada, passant pels conceptes anteriors de “restauració”. Amb això, es va començar a innovar en la investigació de les proves i l'estudi d'obres d'art, les quals estaven orientades en la temàtica de “Una sola vegada en la vida de la construcció”. D'acord amb la nova perspectiva, poder realitzar una conservació preventiva va fer que l'aplicació continués amb bones practiques de manteniment necessari, amb el recolzament de mètodes d'inspecció/control i amb estructures per presentar el coneixement i les dates d'avaluació. En els casos més difícils, la conservació implica també el desenvolupament d'activitats previstes per evitar danys junt amb el manteniment dels edificis.

7. “TEXTILE SHELTERS FOR ARCHAEOLOGICAL AREAS: A CHANGE IN THE PRESERVATION OF CULTURAL HERITAGE”

“REFUGIS TÈXTILS PER A ZONES ARQUEOLÒGIQUES: UN CANVI EN LA PRESERVACIÓ DEL PATRIMONI CULTURAL”

Per superar les limitacions dels sistemes tradicionals de cobertura, s'elabora un projecte per a la creació de nous centres d'acollida amb la combinació dels requisits de conservació actuals, junt amb nous temes, tals com, la flexibilitat, viabilitat, els baixos requisits de manteniment, la facilitat de muntatge, etc.

El tema d'aquest article es la protecció de llocs arqueològics, i un projecte de prova realitzat a Cerdanya (Itàlia). Diversos aspectes tècnics seran analitzats, destacant les solucions que podrien

contribuir als danys en llocs que serveixen com a protecció. El dispositiu experimental i els resultats de seccions descriuen la creació de dos prototips, produïts amb la fi d'avaluar una solució alternativa al refugi provisional i un conjunt de mesures de radiació solar, preses per poder avaluar el comportament d'alguns materials tèxtils innovadors en comparació amb els tradicionals.

8. “SPERIMENTAZIONE DI TECNICHE ANALITICHE INTEGRATE PER LA DIAGNOSTICA FINALIZZATA ALLA CONSERVAZIONE PREVENTIVA”

“EXPERIMENTACIÓ DE LES TÈCNIQUES ANALÍTIQUES INTEGRADES PER AL DISGNÒSTIC COMPLERT DE LA PRESERVACIÓ PREVENTIVA”

La conservació preventiva es duu a terme a través d'un conjunt de pràctiques, que requereixen el suport dels sistemes de control i emmagatzematge de coneixements.

A aquests efectes s'han desenvolupat protocols d'enquesta i procediments que compleixen amb els requisits de fiabilitat i repetibilitat de les proves de camp, velocitat d'execució i aplicació a les àrees grans. Proporcionen informació a temps real, obtenint dades sense tocar la superfície de l'objecte. Un altre requisit considerat important per a l'aplicabilitat del patrimoni comú és el compromís de recursos financers necessaris per obtenir avaluacions preliminars essencials, i indicacions de l'evolució dels processos que causen o poden causar la degradació.

9. “UN CICLO DEL CINQUECENTO O UN AMBIENTE DELL’OTTOCENTO? INDAGINI PROPEDEUTICHE AL RESTAURO DEL SALONE DI ULISSE NELLA PALAZZO DELLA PROVINCIA DI BERGAMO”

“UN CICLE DEL CINQUECENTO O UN AMBIENT DEL OTTOCENTO? INVESTIGACIONS PRELIMINARS EN LA RESTAURACIÓ DE L'EXPOSICIÓ D'ULISSES EN EL PALAU DE LA PROVÍNCIA DE BÈRGAM”

En els últims anys, l'Institut Central de Restauració (ICR) va consultar el control periòdic dels frescos de la Sala d'Ulisses a la província de Palau Bèrgam. El seu deteriorament va ser degut principalment a la deformació de la tela de suport. Entre 1551 i 1553, Giovanni Battista Castello va pintar els frescos de la Vila Lanzi, Gorlago. La decoració segueix sent un dels pocs cicles complets de les seves obres a Itàlia. A la meitat del segle XIX, Vila Lanzi era una granja i l'ús no podria encaixar amb els requisits de conservació dels frescos.

La termografia infraroja (IRT) va ser significativament útil en la recerca de suports metàl·lics, gràcies a aquest anàlisi tèrmic dinàmic.

10. “INDAGINI SULLE PROBLEMATICHE CONSERVATIVE LEGATE ALL’UMIDITA”**“QÜESTIONS CONSERVADORES RELATIVES A LA HUMITAT”**

La interacció entre els objectes en estuc i la construcció del sistema que els conté, poques vegades ha estat investigat. En aquest programa de recerca on es proporcionen els resultats obtinguts breument, es va decidir incloure una anàlisi dels problemes relacionats amb la conservació de la humitat, amb l'objectiu més ampli de contribuir en l'elaboració de protocols metodològics per a l'emmagatzematge.

Per tant, aquest estudi es duu a terme amb investigacions in situ al laboratori, treballant en un cas on l'estudi està objectivament condicionat per la impossibilitat de prendre mostres de coherència necessària.

11. “RESTAURI A RISCHIO: MICROCLIMA E DIFFERENZE SUPERFICIALI DEI MATERIALI IN OPERA”**“RESTAURACIÓ EN RISC: MICROCLIMA I DIFERÈNCIES SUPERFICIALS DEL MATERIAL EN OPERA”**

La investigació té com a objectiu posar en pràctica la seva aplicació en el procés de preservació del patrimoni. Entre les tècniques utilitzades, la termografia infraroja (IRT) útilment resumeix la inspecció preliminar en el rang visible (anàlisi visual i l'ús del microscopi). La investigació suposa que, en condicions d'alta humitat i caigudes brusques de temperatura, el risc de condensació és superior en les mateixes àrees que ja compten amb un gradient de temperatura negativa (estructures subjacents de diferents recobriments o diferència de les tècniques del morter utilitzat). La integració de la IRT, l'anàlisi microscòpic dels materials d'acabat, el control del microclima, proporcionarien un recull adequat de les previsions anteriors per al treball científic en l'art cultural 221 del Reglament d'Obres Públiques 554/99, com també per establir els valors límits per a la bona conservació dels materials en el treball, és a dir, per produir un element essencial en qualsevol pla de manteniment.

12. “LA PREVENZIONE DEL DANNO E PRESTAZIONI DEI TRATTAMENTI CONSERVATIVI: METODI DIAGNOSTICI INNOVATIVI PER APPLICAZIONI IN SITU”**“PREVENCIÓ DE DANYS I EXECUCIÓ DEL TRATTAMENT CONSERVATIVI: INNOVADORS MÈTODES DE DIAGNÒSTIC PER A APLICACIONS IN SITU”**

Les recents aplicacions de la termografia d'infrarojos (IRT) contribueixen a avaluar eficaçment el camp dels intercanvis tèrmics i higromètrics entre la superfície de la pedra i el medi ambient, mitjançant la localització de la difusió d'aigua dins del sistema porós de la capa superficial externa. L'estudi de l'evolució es realitza a través de l'aplicació d'IRT, i d'aigua líquida en la superfície de la pedra per mitjà de la caiguda de la humitat i els mètodes de l'anell.

Els mètodes de diagnòstic actuals són de gran viabilitat, de fàcil aplicació i baix cost: l'examen termogràfic inclou poder recuperar amidaments en diferents llocs, per tant és possible aplicar les eines estadístiques per a la data d'adquisició i integrar les dades obtingudes per mitjà dels procediments estables (absorció capil·lar, assecat, esponja en contacte amb l'índex, etc.).

13. “METODI DI ANALISI PRELIMINARE DEL DEGRADO PER I BENI CULTURALI”**“MÈTODE D'ANÀLISI PRELIMINAR DE LA DEGRADACIÓ DEL PATRIMONI CULTURAL”**

La lectura de les geometries i de la textura dels materials de les parets és una font d'informació valuosa per a la comprensió de l'edifici. Permet la detecció de les intervencions, que de vegades fins i tot, pot modificar l'esquema de distribució de càrregues. Les enquestes i la investigació històrica revela que molts dels canvis que es produeixen amb el temps, com ara les parets desmuntables, la unitat de construcció de l'època i la presència d'elements metàl·lics de consolidació, no es pot avaluar sense proves no destructives. Amb l'ús de la termografia infraroja (IRT) es pot obtenir immediatament imatges de les capes que estan sota l'escaiola, encara que siguin tenyides o pintades. Això no és una lectura directa de les pedres, però l'empremta que deixen a les superfícies, quan es sotmet a la calor, ens ajuden a obtenir dades, gràcies a les diferents propietats tèrmiques dels materials.

14. “COMPATIBILITÀ E DURABILITÀ DEI RESTAURI DEGLI AFFRESCHI IN CONDIZIONI MICROCLIMATICHE SEVERE”**“COMPATIBILITAT I DURABILITAT DE LA RESTAURACIÓ DEL FRESC EN CONDICIONS MICROCLIMÀTIQUES SEVERES”**

La pràctica inclou la restauració del rejuntat i la manca d'integració dels guixos. Els restauradors utilitzen diferents eines i materials per a la intervenció. Investigacions recents demostren que els arrebossats per al sanejament tenen diferents comportaments higromètrics. La investigació parteix de l'observació en el camp del comportament higroscòpic dels morters de diferents textures.

En el cas de la contigüitat entre diferents acabats, les vores de la superfície més rugosa (al voltant de textura més compacta) mostren danys importants.

La detecció primària de les zones de risc, mitjançant l'ús de la termografia infraroja (IRT) en condicions transitòries, és un gran negoci per a la preservació d'edificis històrics sense un sistema de climatització individual, i un avanç de les tècniques per a la restauració de les superfícies precieuses. El document informa sobre l'aplicació de la integració de la IRT i la microscòpia al pati de recent restauració a Santa Maria de Sant Pau Església a Canterbury.

ANNEX 7

TÍTOL D'ASSISTÈNCIA I INFORMACIÓ PONÈNCIA TESTO

Contingut

- 1. TÍTOL D'ASSISTÈNCIA PONÈNCIA TESTO
- 2. INFORMACIÓ PONÈNCIA TESTO

1. TÍTOL D'ASSISTÈNCIA PONÈNCIA TESTO:

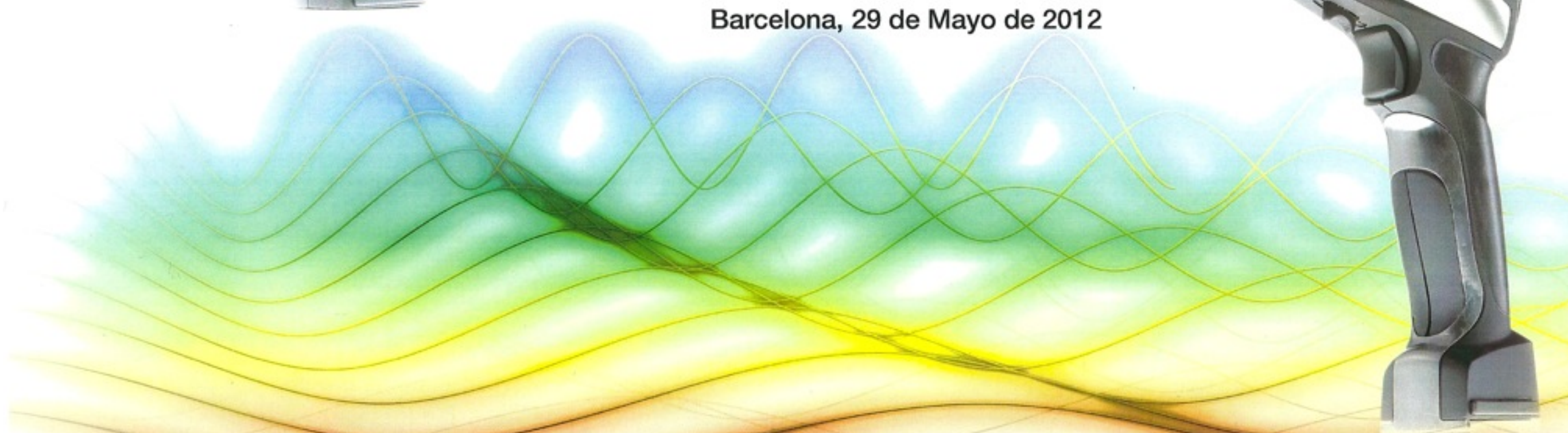


**PATRICIA SANCHEZ
MANCHON**

HA ASISTIDO AL

**8º SEMINARIO
TERMOGRAFÍA EN
EDIFICACIÓN**

Barcelona, 29 de Mayo de 2012



2. INFORMACIÓ PONÈNCIA TESTO:



Compromiso con el futuro

Termografía en la construcción con las cámaras termográficas Testo



testo 875



testo 876



testo 881



testo 882



testo 885



Para ver mucho más sin contacto

Con las cámaras térmicas Testo se detectan anomalías y daños en cerramientos o interiores de forma rápida y sencilla. Se comprueban totalmente materiales y componentes sin daño alguno gracias al proceso de creación de imagen. Pérdidas energéticas, puentes térmicos o fugas se localizan sin contacto; al contrario de lo que ocurre con otros métodos que necesitan dismantelar tuberías o cableados, con una cámara termográfica Testo tan solo es necesario un vistazo a la pantalla. La visualización del riesgo de condensación para la localización exacta de zonas con riesgo de aparición de moho es una prestación única en la termografía de la construcción.

Cámaras térmicas testo para la termografía en la construcción:

- previenen daños y ahorran dinero
- destacan por sus imágenes de alta resolución
- permiten un rápido y cómodo análisis
- su funcionamiento es muy intuitivo
- muestran una amplia sección de imagen gracias al objetivo angular ultraligero

Para el uso diario en el negocio de la construcción

Gracias a su excelente detector y a la calidad de las lentes, así como a sus sistemas de funcionamiento inteligentes, verá hasta el último detalle, sin importar si se trata de imágenes panorámicas o de pequeños fragmentos de un objeto medido. Tanto el menú de la cámara como el software para PC IRSoft le garantizan un análisis profesional pero sencillo de los datos de la termografía. Hasta la menor diferencia en temperatura queda en evidencia porque las cámaras Testo están equipadas con una resolución de imagen excepcional. Las cámaras Testo para la termografía en la construcción ahorran tiempo, dinero y aseguran un aprovechamiento racional de la energía.



Ergonomía ideal



Funcionamiento intuitivo



¿En que consiste la termografía?

Cualquier objeto por encima de los -273 grados centígrados (el cero absoluto) emite radiación de calor infrarroja, invisible al ojo humano. Las cámaras termográficas, sin embargo, pueden convertir esta radiación infrarroja en señales eléctricas y mostrarlas

como una imagen térmica. En resumen, una cámara termográfica hace visible al ojo humano la radiación infrarroja.



Óptima calidad de imagen e innovación tecnológica

En el campo de la termografía de la construcción, Testo dispone de la cámara termográfica adecuada para cada aplicación. Equipadas con ópticas de Germanio y detectores de la más alta calidad, proporcionan una calidad de imagen insuperable para cualquier aplicación termográfica. Gracias a la tecnología de SuperResolution (pendiente de patente), cada imagen térmica duplica por cuatro su resolución – cuatro veces más píxeles por imagen. Las cámaras Testo ofrecen mas detalles y por tanto más fiabilidad en la medición.



Imagen de alta resolución y componentes fabricados en alta calidad “made in Germany”: simplemente la mejor termografía con Testo y la experiencia que nos avala tras 50 años liderando la tecnología de medición.

Elevado rendimiento, intuitivas y fiables

Su funcionamiento intuitivo y su manejo sencillo permiten la utilización de las cámaras en cualquier situación con total seguridad y flexibilidad. El potente software para PC IRSoft combina de forma ideal prestaciones de nivel profesional con un manejo de nivel principiante: se pueden elaborar fácilmente sofisticados análisis de las termografías, con la ayuda de las plantillas preconfiguradas se redactan informes completos, y con la función TwinPix se puede superponer una termografía a la imagen real del objeto termografiado. La superposición se puede transformar en una sola imagen y mostrar en el monitor del PC.



Cámaras termográficas Testo para la termografía de la construcción

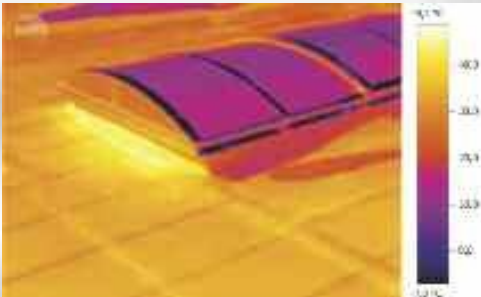
La termografía se ha revelado como un método ideal para la detección de fallos en la construcción. Con las cámaras termográficas Testo se pueden detectar fallos en la climatización de los edificios y son la herramienta ideal para una eficaz consultoría energética.

1. Detecte fallos en la construcción y asegure la calidad de la misma

El análisis con una cámara termográfica Testo es un método rápido y eficaz para detectar posibles fallos en la construcción. Además, las cámaras termográficas Testo son adecuadas como prueba de la calidad y la correcta implementación de las medidas en la construcción. Pérdidas de calor, humedades o fallos en el aislamiento de un edificio son fácilmente visibles mediante una imagen térmica ¡Y todo mediante una medición sin contacto!

2. Localice fugas en techos de forma precisa

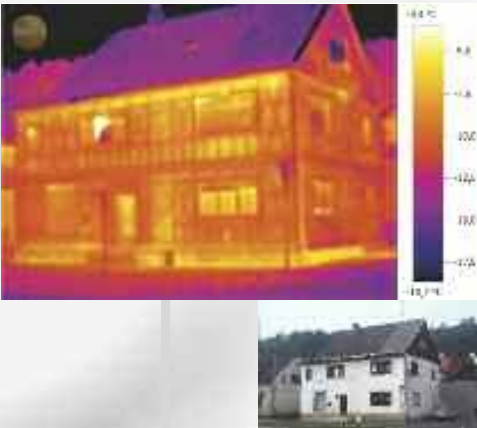
Las áreas de la estructura del techo donde ha penetrado la humedad retienen el calor solar durante más tiempo que las áreas intactas (especialmente en los techos planos) por lo que el techo se enfría irregularmente durante la noche. Como resultado de estas diferencias en temperatura, una cámara termográfica Testo muestra precisamente estas áreas del techo con humedad o daños en el aislamiento.





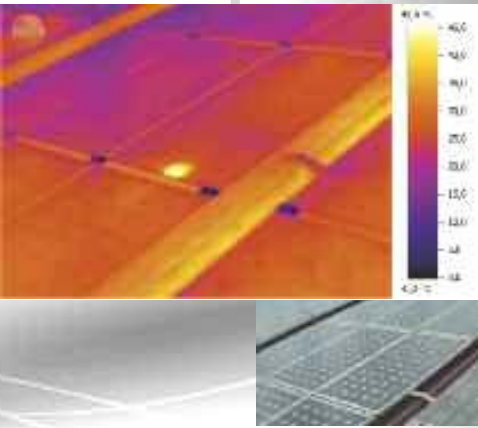
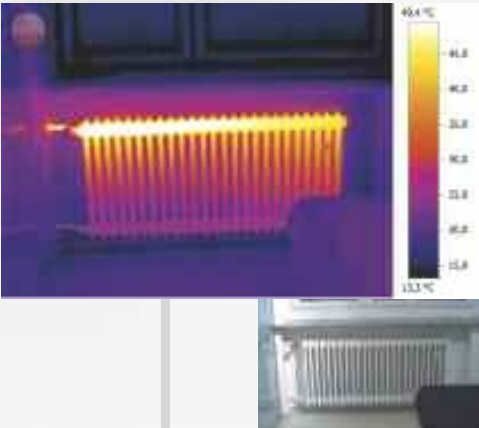
3. Realizar una cómoda consultoría energética

En la termografía de la construcción, la tecnología infrarroja se ha revelado como ideal para el análisis rápido y efectivo de las pérdidas energéticas en la climatización de un edificio. Gracias a su elevada resolución en temperatura, las cámaras Testo muestran al detalle puentes térmicos, aislamientos defectuosos, fallos constructivos o daños. Son idóneas para el registro y la documentación de las pérdidas energéticas producidas en puertas y ventanas exteriores, cajones de persianas, huecos de los radiadores, techos o en la totalidad del cerramiento. Use las cámaras termográficas Testo para cómodos diagnósticos, tareas de mantenimiento y cualquier aplicación relacionada con la consultoría energética.



4. Visualizar sistemas e instalaciones de calefacción

Gracias a su funcionamiento sencillo e intuitivo, las cámaras termográficas Testo inspeccionan sistemas de calefacción y aire acondicionado de forma rápida y segura. Un vistazo es suficiente para descubrir distribuciones irregulares de la temperatura, como las causadas por sedimentos o bloqueos en los radiadores.



5. Monitorizar y comprobar sistemas de energía solar

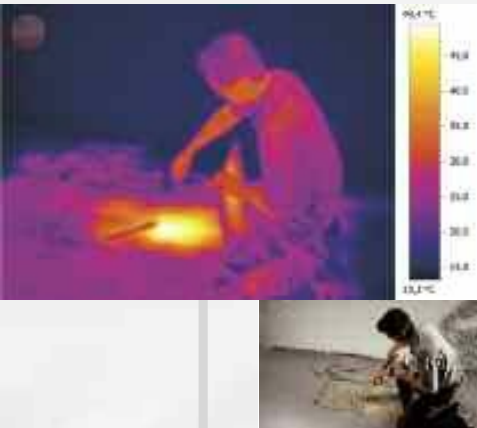
Dos son las razones principales para examinar un sistema de energía solar: la seguridad y el rendimiento. Todo sistema de energía solar alcanza su pleno rendimiento en días muy soleados. Se pueden monitorizar sistemas fotovoltaicos tanto mayores como menores sin contacto, a distancia de seguridad y de forma muy eficaz con las cámaras termográficas Testo. Se identifican defectos, se garantiza el funcionamiento regular de los componentes y se consigue la máxima viabilidad económica del sistema. Gracias a la posibilidad de introducir el parámetro "radiación solar" se gana seguridad adicional: el valor introducido se memoriza junto a la termografía y se recupera con posterioridad para efectuar el análisis pertinente.



Cámaras termográficas Testo para la termografía de la construcción

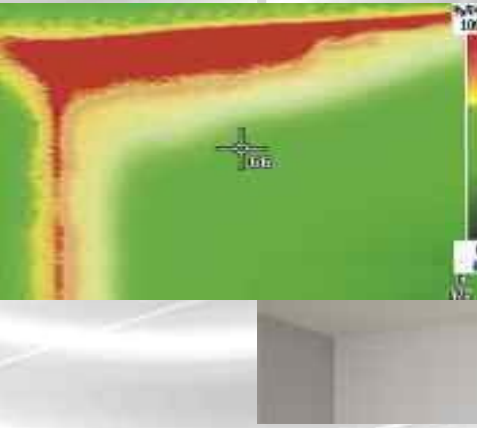
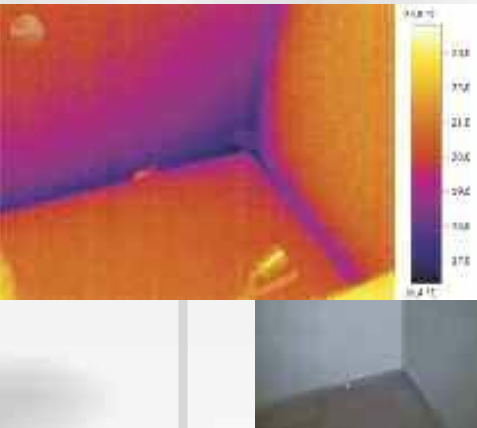
6. Tras la pista de una tubería rota

Si existe la sospecha que hay un escape en una tubería, a menudo la única solución es levantar muchas baldosas o agujerear tabiques hasta dar con él. Con las cámaras térmicas Testo se minimizan los trabajos de albañilería y se reducen los costes porque las fugas en suelos radiantes u otras tuberías inaccesibles se localizan de forma muy precisa. Así se evitan perforaciones innecesarias y los costes de reparación son considerablemente menores.



7. Examinar daños por humedad

Una tubería rota no es la única causa de la humedad en una pared. Un sistema de drenaje defectuoso, una cañería bloqueada o una filtración también pueden provocar que un muro se humedezca. Con las cámaras termográficas Testo se encuentran los orígenes de todos estos problemas antes de que se extiendan demasiado y provoquen más daños.



8. Prevenir la propagación de moho

Los puentes térmicos suponen pérdidas energéticas. En estos lugares, la humedad ambiental puede llegar a condensarse y por tanto pueden enmohecerse, con el consiguiente riesgo para la salud de los habitantes. Midiendo la humedad y temperatura ambiente además de la temperatura superficial de la pared, las cámaras térmicas Testo calculan el riesgo de condensación en cada punto de medición. La propagación de moho se visualiza en pantalla antes de que se produzca: las áreas con riesgo de condensación aparecen en rojo, las que no, en verde. Así se puede minimizar dicho riesgo, incluso en los rincones más escondidos de una vivienda.

9. Verificar la hermeticidad de una nueva construcción

Si las puertas o ventanas no se instalan correctamente, en invierno el frío se puede colar por las rendijas y el calor del interior de la vivienda se escapa. Como resultado, se producen pérdidas de energía y peor aún, el gasto en calefacción aumenta. La combinación de la termografía y el test de hermeticidad Blower Door se ha demostrado como la más eficaz: mediante este procedimiento, se crea una presión negativa en la vivienda para que penetre el aire exterior por las rendijas, aire que se detecta fácilmente con las cámaras termográficas, visualizando así cualquier resquicio antes de que una instalación errónea provoque unos trabajos de reparación costosos y caros.

7

Visión global de las cámaras termográficas Testo

Características	testo 875-1	testo 875-2	testo 876	testo 881-1	testo 881-2	testo 882	Novedad testo 885-1	Novedad testo 885-2	
Detector (en píxeles)			160 x 120				320 x 240		
Tecnología SuperResolution			(a 320 x 240)				(a 640 x 480)		
Sensibilidad térmica (NETD)		< 80 mK		< 50 mK		< 60 mK	< 30 mK		
Rango medición de temperatura		-20 °C a +280 °C				-20 °C a +350 °C			
Tasa de refresco		9 Hz				33 Hz*			
Objetivo (de serie)			32° x 23°				30° x 20°		
Teleobjetivo intercambiable	-	(9° x 7°)	-	(9° x 7°)	-	-	-	11° x 9°	
Enfoque		manual	manual / motor	manual		manual / motor		manual / auto	
Pantalla giratoria	-	-	✓	-	-	-	✓	✓	
Empuñadura giratoria	-	-	-	-	-	-	✓	✓	
Pantalla táctil	-	-	-	-	-	-	✓	✓	
Medición de elevada temperatura	-	-	-	-	(hasta 550 °C)	(hasta 550 °C)	-	(hasta 1,200 °C)	
Autodetección del punto frío/caliente	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Cálculo de mín-/máx por área	-	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	
Visualización de isotermas	-	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	
Visualización de valores alarma	-	-	-	-	-	-	✓	✓	
Visualización del riesgo de condensación (mediante introducción manual de datos)	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	
Visualización del riesgo de condensación (mediante medición con sonda inalámbrica**)	-	-	-	-	(✓)	(✓)	-	(✓)	
Modo Solar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Registro de voz	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	
Cámara digital integrada	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Iluminación por LEDs integrada	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	
Asistente para Imagen Panorámica	-	-	-	-	-	-	✓	✓	
Tecnología SiteRecognition	-	-	-	-	-	-	-	✓	
Medición por vídeo de hasta 3 puntos de medición (vía USB)	-	-	-	-	-	-	✓	✓	
Laser***	-	-	-		Indicador láser		Marcador láser		

(✓) Opcional ✓ De serie - no disponible

* en zona UE, 9 Hz fuera zona UE

** según los permisos de cada país

18

**ANNEX 8: TAULA COMPARATIVA DIFERENTS MODELS DE CÀMERES TERMOGRÀFIQUES I ENQUESTA A EMPRESA
TERMOGRAFICS**

ANNEX 8

TAULA COMPARATIVA DIFERENTS MODELS DE CÀMERES TERMOGRÀFIQUES I
ENQUESTA A EMPRESA TERMOGRAFICS

Contingut

- 1. COMPARATIVA DE DIFERENTS CÀMERES TERMOGRÀFIQUES
- 2. ENQUESTA EMPRESA TERMOGRAFICS

1. COMPARATIVA DE DIFERENTS CÀMERES TERMOGRÀFIQUES:

A continuació s'exposa una taula amb diferents models de càmeres termogràfiques que es troben en el mercat, i on es poden observar detalladament les seves característiques:

MARQUES COMERCIALS										
CARACTERÍSTIQUES		INSATEC / NEC				EMPIRIC		TESTO		
		H 2640 (gamma alta)	TH9100MR/WR (gamma alta)	G 100 (gamma mitja)	G30 (gamma baixa)	DL 700 (gamma alta)	Sèrie E (gamma baixa)	882 (gamma mitja)	880 (gamma mitja)	875 (gamma baixa)
	Resolució	320 x 240 píxels	320 x 240 píxels	320 x 240 píxels	160 x 120 píxels	384 x 288 píxels	160 x 120 píxels	320 x 240 píxels	320 x 240 píxels	160 x 120 píxels
	Precisió	0.03°C (a 30°C)	0.03°C (a 30°C)	0.08°C (a 30°C)	0.1°C (a 30°C)	0.06°C (a 30°C)	0.1°C (a 30°C)	0,06°C (a 30°C)	0,1°C (a 30°C)	0,11°C (a 30°C)
	Rang	De -40 a 2000°C (graduable segons inspecció)	De -40 a 2000°C (graduable segons inspecció)	De -40 a 1500°C (graduable segons inspecció)	-20 a 350 °C (graduable segons inspecció)	-20°C a 1200°C (graduable segons inspecció)	-20°C a 600°C (graduable segons inspecció)	-20°C a 550°C (graduable segons inspecció)	-20 °C a 350°C (graduable segons inspecció)	De -20 a +280°C (graduable segons inspecció)
	Òptica	<ul style="list-style-type: none"> Superposició d'imatge Tèrmica/Visual Display 3.5" LCD y visor monocular Enfocament: 30cm a infinit Objectiu: 21.7 °(H) x 16.4 °(V) 	<ul style="list-style-type: none"> Superposició d'imatge Tèrmica/Visual Display 3.5" LCD y visor monocular Enfocament: 30cm a infinit Objectiu: 21.7 °(H) x 16.4 °(V) 	<ul style="list-style-type: none"> Display color : color/monocrom, positiu/negatiu Display 3.5" LCD Enfocament: 10cm a infinit Objectiu: 32 °(H) x 24 °(V) 	<ul style="list-style-type: none"> Display 2.7" LCD Enfocament: Manual (de 1.3m a infinit) Objectiu: 28°(H) x 21°(V) 	<ul style="list-style-type: none"> Display amb 9 paletes de color Display LCD de alta resolució Objectiu: 16°x12°/0.5m 	<ul style="list-style-type: none"> Display amb fins a 11 paletes de color Display LCD de 2.5" Objectiu: 18°x13°/0.3m 	<ul style="list-style-type: none"> Fusió entre imatge tèrmica i real TFT 3,5" Objectiu: F1 32°x24° 	<ul style="list-style-type: none"> Objectiu angular 32°x24° i teleobjectiu 12°x9° 	<ul style="list-style-type: none"> Teleobjectiu angular per interiors i tele per façanes
	Gravació i tractament d'imatges	<ul style="list-style-type: none"> Zoom :x2 y x4 Memòria de gravació en temps real incorporada. Targeta SD 	<ul style="list-style-type: none"> Zoom :x2 y x4 Memòria de gravació en temps real incorporada. Targeta SD 	<ul style="list-style-type: none"> Zoom :x2 y x4 Targeta SD 	<ul style="list-style-type: none"> Zoom: 1.3 Mpíxels Targeta SD 	<ul style="list-style-type: none"> Zomm: 1x a 8x Memòria Flash (1GB) per 4000 imatges 	<ul style="list-style-type: none"> Zoom: 2x Memòria Flash per 1000 imatges 	<ul style="list-style-type: none"> Targeta SD 	<ul style="list-style-type: none"> Targeta SD 	<ul style="list-style-type: none"> Targeta SD
	Preu	29.000 €	18.900 €	7.800 €	3.950 €	16.520 €	4.720 €	7.480 €	5.653 €	4.300 €

2. ENQUESTA EMPRESA TERMOGRAFICS:

Durant la realització d'aquest Projecte es va realitzar una visita a una empresa que ofereix un servei de Termografia als seus clients. L'objectiu d'aquesta visita era l'obtenció de dades que ajudessin a aprofundir més sobre el tema, en referència a mètodes de treball, tipologies de càmeres utilitzades, etc. Seguidament s'exposa l'enquesta que es va fer a Marc Duxans Bosch (Enginyer Tècnic Industrial):

- Feu servir la tècnica de Termografia per a edificis?

No, aquesta empresa es dedica a instal·lacions elèctriques, encara que si ens demanen algun cas d'aquesta tipologia podem fer-ho. En un cas vam fer un estudi de terra radiant, i vam obtenir dades molt interessant de pèrdues calor.

- Quin tipus de càmera utilitzeu?

En aquesta empresa utilitzem un càmera del tipus LAND CYCLOPS TI8M, amb les següents característiques: $-20^{\circ}\text{C} < - > 500^{\circ}\text{C} \pm 2\%$ $0 \pm 2^{\circ}\text{C}$ de 320×240 píxels.



- Com creieu que es millor treballar de dia o de nit?

No tenim cap preferència d'horari per realitzar els estudis. Si es realitza la fotografia correctament s'obtenen les mateixes dades tant de dia com de nit.

- Quan temps es triga en realitzar l'estudi?

Depèn de la dimensió de l'objecte a estudiar

- Quina ha estat la patologia més deficient que heu analitzat?

NS/NC

- Quantes persones es necessiten per duu a terme l'execució?

Pot anar només una persona a fer l'estudi.

- Quina quantitat de dades s'obtenen un cop passades les imatges al software?

S'obté una imatge de punts en ordinador. Contra més resolució, més punts, i per tant més dades. Pots canviar la paleta de colors segons la temperatura i congelar la imatge. La imatge la passes de la càmera a l'ordinador amb una targeta de memòria i amb un programa especial (software) obtens totes les dades necessàries. És recomanable obtenir una fotografia real de la zona a inspeccionar.

- Creus que és una innovació tecnològica profitosa?

Sí, facilita molt el treball, i és qüestió de poc temps que les empreses d'aquests sectors incloguin aquesta metodologia de treball dins dels seus estudis.

- Heu realitzat un curs de formació específic per tractar aquest tema?

No perquè som enginyers industrials, però es recomanable per a altres persones que no tinguin nocions tècniques. Tot i això si que és necessària documentar-se per saber realitzar una correcta imatge tèrmica.



Termografics

C/ Lluís Companys, 66
Granollers – 08401 – Barcelona
Tel.: +34 93 870 86 45 - Fax +34 93 879 57 02
info@termografics.com

